

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE QUITO

**CARRERA:
INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:
INGENIEROS ELECTRÓNICOS**

**TEMA:
DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE TARJETA PARA LA REGULACIÓN
AUTOMÁTICA DE VOLTAJE PARA EL CONTROL DE UN GENERADOR
TÉRMICO PARA LA UNIDAD DE NEGOCIO CELEC EP-TERMOPICHINCHA**

**AUTORES:
FERNANDO DAVID MONTESDEOCA ESCOBAR
KEVIN MIGUEL SALAZAR FLORES**

**TUTOR:
EDUARDO RODRIGO TORRES SANTOS**

Quito, Julio 2018

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros, Fernando David Montesdeoca Escobar y Kevin Miguel Salazar Flores, con documentos de identificación N° 171650809-6 y N° 171597278-0 respectivamente, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación intitulado “DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE TARJETA PARA LA REGULACIÓN AUTOMÁTICA DE VOLTAJE PARA EL CONTROL DE UN GENERADOR TÉRMICO PARA LA UNIDAD DE NEGOCIO CELEC EP-TERMOPICHINCHA” mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingenieros Electrónicos en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

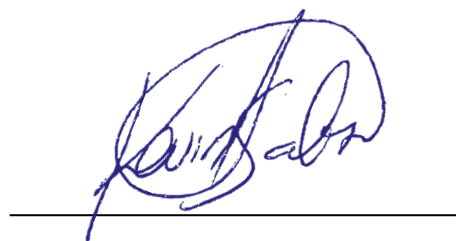
En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito julio 2018



Fernando David Montesdeoca Escobar

CI: 171650809-6



Kevin Miguel Salazar Flores

CI: 171597278-0

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el Proyecto Técnico, “DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE TARJETA PARA LA REGULACIÓN AUTOMÁTICA DE VOLTAJE PARA EL CONTROL DE UN GENERADOR TÉRMICO PARA LA UNIDAD DE NEGOCIO CELEC EP-TERMOPICHINCHA” realizado por Fernando David Montesdeoca Escobar y Kevin Miguel Salazar Flores, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito julio 2018



Eduardo Rodrigo Torres Santos

CI: 1713654604

DEDICATORIA

Dedico el presente proyecto a mi madre, por haber realizado grandes sacrificios a lo largo de 6 años, para darme la oportunidad de estudiar y convertirme en la persona que soy ahora, por haber estado incansablemente a mi lado sin dejarme caer e impulsándome para seguir, por haberte convertido en mi amiga sin dejar de ser madre. Te amo mucho madrecita.

También a mi hermano, pues él siempre fue mi ejemplo a seguir y a pesar de las peleas siempre estuvo ahí para aconsejarme y guiarme a lo largo de este camino. Tengo el orgullo de decir que tengo al mejor hermano del mundo.

A mi padre y a mi abuelita, a quienes extraño tanto, pero sé que desde donde quiera que estén han estado apoyándome y han sido testigos de este logro. Nunca los olvidaré.

Se lo dedico también a mi novia, quien estuvo presente casi desde el inicio de la carrera, y quien ha llegado a convertirse en una parte muy importante de mi vida, quien ha sido mi compañera en los momentos buenos y más aún en los malos, quien ha sabido estar ahí para escucharme y brindarme su hombro para descansar. Te amo Estefy.

A mi hermana quien a pesar de haber llegado a mi vida en los últimos años, se ha convertido en una amiga, me ha brindado el placer de compartir con ella y recuperar de algún modo el tiempo perdido.

Finalmente se lo dedico a mis sobrinos: Ignacio, Benjamín, Martín y Dana. Para quienes quiero ser un ejemplo de rectitud, responsabilidad y honestidad; y que sepan que siempre que lo necesiten contarán conmigo.

Fernando

DEDICATORIA

En toda mi vida universitaria viví muchas experiencias, algunas buenas otras no tan felices, pero siempre tuve a personas que estuvieron ahí para ayudarme, es por eso que dedico mi tesis a cada una de esas personas que me ayudaron a culminar mi proceso de estudiante.

Se lo dedico a Dios por darme el conocimiento y fuerzas para siempre seguir adelante, a mis padres Paco Salazar e Isabel Flores ya que ellos siempre estuvieron conmigo, fueron el pilar principal que sostuvo toda mi carrera profesional, siempre estaré muy agradecido por toda la ayuda que me brindaron.

También la dedico a mi hermano Paul que siempre estuvo aconsejándome y ayudándome en cualquier duda que tuve el siempre será un ejemplo a quien debo seguir, a mis amigos de la universidad Fernando, Alejandro, Patricio, Esther, Mauricio, Joselyn, Héctor, Jonathan, que siempre fueron el apoyo para cursar cada materia y nunca rendirnos, a mis amigos del colegio Cristhian, Luis, Andrés, David que los conozco tanto tiempo y siempre estuvieron ahí para brindarme cualquier ayuda.

Y de manera muy especial a Evelyn que es una persona la cual la quiero mucho y siempre estuvo ahí para ayudarme ¡GRACIAS!

Kevin

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a nuestras familias, por haber estado siempre que los necesitamos y siempre ser ese empujoncito que a veces nos hacía falta para cumplir con nuestros objetivos.

También agradecemos enormemente a la Unidad de Negocio CELEC EP – Termopichincha, por ser quien patrocinó este proyecto, pero de manera especial a los ingenieros: Milton Santander, Carlos Villacís, y Juan Salazar, por habernos ayudado siempre con la mejor disposición en la gestión y el desarrollo de nuestro proyecto. Sin su ayuda esto no habría sido posible.

Finalmente, queremos agradecer nuestra querida universidad por habernos impartido los conocimientos necesarios para convertirnos en los profesionales que somos ahora, y de manera especial a nuestro tutor Ing. Eduardo Torres, por haber sido nuestro guía y consejero en este proyecto, y por nunca haber dejado de estar pendiente en la finalización del mismo.

Gracias por ayudarnos a ser los grandes profesionales que somos ahora.

Fernando y Kevin

Tabla de contenido

ANTECEDENTES.....	1
1.1 Problema de estudio	1
1.2 Justificación.....	1
1.3 Planteamiento del problema	2
1.4 Propuesta de solución	2
1.5 Objetivos	2
1.5.1 Objetivo general	2
1.5.2 Objetivos específicos	2
MARCO TEÓRICO.....	4
2.1 Raspberry Pi	4
2.1	4
2.1.1 Hardware	4
2.1.2 Software	5
2.2 Controladores industriales	6
2.2.1 Acción de control de dos posiciones o de encendido y apagado (on/off)....	6
2.2.2 Acción de control proporcional.....	7
2.2.3 Acción de control integral.....	7
2.2.4 Acción de control proporcional-integral	8
2.2.5 Acción de control proporcional-derivativa	8
2.2.6 Acción de control proporcional-integral-derivativa.....	9
2.3 Rectificadores trifásicos	9
2.3.1 Rectificadores trifásicos controlados	11
2.3.2 Puente rectificador trifásico semicontrolado.....	12
2.4 Reguladores automáticos de voltaje (AVR)	13

DISEÑO	15
3.1 Materiales a utilizar	15
3.2 Circuito cruce por cero	16
3.3 Circuito rectificador	17
3.4 Acople de potencia y control.....	18
3.5 Comunicación arduino-raspberry	22
3.6 Diseño y construcción pcb	22
Pruebas y resultados	24
4.1 Pruebas pcb.....	24
4.2 Pruebas con generador en vacío y con carga.....	26
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	31
5.1 Conclusiones	31
5.2 Recomendaciones	32
Referencias	33
ANEXOS	35

Tabla de figuras

Figura 2.1 Componentes básicos Raspberry Pi.....	4
Figura 2.2 Distribución pines GPIO.....	5
Figura 2.3 a) Rectificador trifásico tipo puente b) Voltaje del generador y salida c) Corrientes carga resistiva	10
Figura 2.4 Esquema rectificador trifásico controlado	11
Figura 2.5 Esquema puente rectificador trifásico semicontrolado.....	12
Figura 2.6 Comparación del voltaje de salida suministrado a la carga a) puente rectificador trifásico totalmente controlado b) puente rectificador trifásico semicontrolado	13
Figura 2.7 Caracterización del sistema de control automático	14
Figura 3.1 Caracterización general del sistema de control automático.....	15
Figura 3.2 Circuito cruce por cero	16
Figura 3.3 Simulación circuito cruce por cero	17
Figura 3.4 Etapa de rectificación	18
Figura 3.5 Acople de potencia y control	19
Figura 3.6 Rectificador monofásico controlado.....	19
Figura 3.7 Señal de salida con ángulo de disparo a 30°	20
Figura 3.8 Circuito rectificador Trifásico	21
Figura 3.9 Señal rectificada.....	21
Figura 3.10 Comunicación Arduino-Raspberry	22
Figura 3.11 Diseño PCB	23
Figura 3.12 Placa terminada.....	23
Figura 4.1 Pulsos generados circuito cruce por cero.....	24
Figura 4.2 Ángulo de disparo SCR a) 180° b) 120° c) 30° d) 0°	25
Figura 4.3 Señal de salida a) $\alpha=0^\circ$ b) $\alpha=30^\circ$ c) $\alpha=120^\circ$ d) $\alpha=180^\circ$	26
Figura 4.4 Señal de salida a) AVR generador b) prototipo.....	27
Figura 4.5 Sintonización del sistema.	28
Figura 4.6 Estabilización del sistema a) AVR generador b) Prototipo	29
Figura 4.7 Señales de salida a) AVR generador b) Prototipo	29
Figura 4.8 Estabilización del sistema con carga a) AVR generador b) Prototipo.....	30

RESUMEN

En el presente proyecto de titulación se desarrolla un controlador automático de voltaje, el cual cumple con el funcionamiento de control de los distintos generadores que se encuentran en la Central Termoeléctrica de Guangopolo.

Se desarrolla un sustituto, una alternativa para el controlador utilizado en la central termoeléctrica, que en este caso es el equipo DECS-250. Además permite fomentar el desarrollo del prototipo con elementos que se puedan encontrar en el mercado electrónico ecuatoriano.

ABSTRACT

In this document present a voltage automatic controller, this have the function to control the different generators of the Guangopolo Thermoelectric Central.

It is implement a substitute, an alternative for an AVR controller, which make the regulation of voltage in the different generators that are located in the Guangopolo Thermoelectric Central, the controller name is the equipment DECS-250. A principal idea to make a prototype of AVR, is to make with elements that exist in the Ecuadorian market

INTRODUCCIÓN

En la presente tesis se desarrolla un prototipo de tarjeta de regulación automática de voltaje, para un generador de 165 kVA en la Central Termoeléctrica de Guangopolo, el motivo de esta tesis es desarrollar una alternativa para el Regulador Automático de Voltaje (AVR, por sus siglas en inglés) utilizado en las centrales termoeléctricas de la Corporación Eléctrica del Ecuador (CELEC-EP).

El desarrollo de esta tesis se describe de la siguiente manera:

En el capítulo 1 se detalla brevemente los antecedentes del tema en general, explicando cómo es el proceso que se empleará, y se provee la información del por qué se realiza el proyecto, así como la solución que se propone implementar.

En el capítulo 2 se presenta la sustentación teórica del proyecto; la cual será la parte fundamental del proyecto, porque contiene las características de los elementos a utilizarse para el desarrollo del prototipo Regulador Automático de Voltaje (AVR, por sus siglas en inglés).

En el capítulo 3 se detalla el diseño del prototipo, presentando los esquemas realizados y simulaciones del prototipo.

En el capítulo 4 se presenta las pruebas y resultados obtenidos al poner en marcha al prototipo, se realiza comparaciones entre el prototipo de esta tesis y un AVR utilizado en la Central Termoeléctrica de Guangopolo.

En el capítulo 5 se muestra las conclusiones obtenidas en base a los diseños, pruebas y resultados obtenidos en el capítulo 3 y 4, en conjunto se presentan recomendaciones para el uso correcto del prototipo.

CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES

1.1 Problema de estudio

La Corporación Eléctrica del Ecuador opera con 200 generadores (Estadística anual y multianual del Sector Eléctrico Ecuatoriano, 2017), cada uno de estos funciona mediante un equipo Sistema de Control Digital de Excitación (DECS, por sus siglas en inglés), el cual es el encargado de realizar el proceso para la generación de energía de acuerdo a los diversos modos de operación que tiene el generador. El DECS-250 (la versión del equipo DECS utilizada en la Central Termoeléctrica de Guangopolo) tiene modos de regulación en donde puede funcionar como Regulador Automático de Voltaje (AVR), Regulador de Corriente de Campo (FCR, por sus siglas en inglés), Regulador de Voltaje de Campo (FVR, por sus siglas en inglés), Regulación de salida de potencia reactiva (VAR, por sus siglas en inglés) y factor de potencia (fp). Cada equipo es traído del exterior, porque el Ecuador no cuenta con un fabricante que realice este tipo de equipos, y los costos de importación de cada repuesto es alto.

1.2 Justificación

CELEC EP-Termopichincha utiliza varios AVR, entre ellos el DECS-250, el cual es utilizado para el control de los generadores en la central, los cuales cumplen la función de regular de manera automática el voltaje entregado por los generadores, variando el voltaje en la bobina de excitación del generador.

La adquisición de los equipos involucra una inversión alta (alrededor de \$12 000 cada uno) porque son importados de Estados Unidos y cada equipo es subutilizado (no funciona a su máxima capacidad) porque se utiliza un solo modo de regulación de los 5 en los que puede funcionar el equipo.

En base al coste y tiempo de adquisición de estos equipos, se propone la realización de un prototipo AVR (replicar la tecnología con componentes de menor costo y que se los encuentre en el mercado local), con el cual se pueda controlar los diferentes generadores de la central

1.3 Planteamiento del problema

CELEC EP-Termopichincha designa de su presupuesto un alto valor en la adquisición de los equipos DECS-250 para el control de sus generadores. Además de su costo, se tiene que los principales inconvenientes son: la exportación los dispositivos, y la vida útil.

Por estas razones se lleva a la interrogante de ¿Por qué no realizar un prototipo de AVR que se pueda fabricar con elementos del mercado local?, ¿Por qué seguir utilizando un equipo demasiado costoso, si se puede fabricar a un costo menor de manera local?

1.4 Propuesta de solución

Desarrollar un prototipo que usará tanto hardware, como software libre. El prototipo se diseñará y construirá con una tarjeta Raspberry PI (debido a la confiabilidad que la misma representa). Se programará el controlador PID en lenguaje Python, necesario para el funcionamiento del circuito de potencia (con elementos del mercado local) para construir un equipo que actúe como un AVR en los generadores de CELEC EP-Termopichincha.

Se realizará una HMI, que permita el ingreso de los parámetros necesarios para la configuración de los parámetros nominales y de proceso del generador, la cual podrá ser realizada en una PC.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Desarrollar un prototipo de tarjeta para la regulación automática de voltaje con software y hardware libre para el control de generadores en la unidad de negocio CELEC EP-Termopichincha

1.5.2 Objetivos específicos

- Caracterizar el sistema de control automático para los generadores donde se realizará el trabajo.

- Desarrollar un circuito de potencia para el funcionamiento del prototipo
- Diseñar un sistema de regulación de voltaje automático mediante la utilización de una Raspberry y software Python.
- Implementar el diseño del sistema propuesto para el funcionamiento de los generadores.
- Verificar y validar el funcionamiento del sistema prototipo experimentalmente.
- Elaborar los manuales técnicos y de operación del prototipo propuesto.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presenta la fundamentación teórica del proyecto, brindando la información necesaria de cada componente a utilizarse en el prototipo, se provee las características técnicas y se detalla el uso de cada elemento.

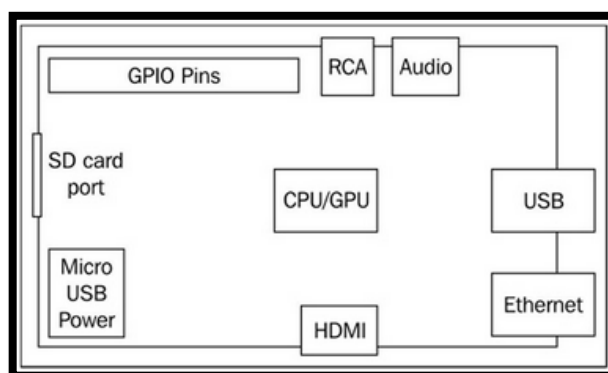
2.1 Raspberry Pi

Es una tarjeta electrónica que por sus características y elementos se le puede considerar una mini computadora, la cual fue desarrollada por la fundación Raspberry Pi, ubicada en Reino Unido. Su principal objetivo es que tanto niños como adultos aprendan sobre computadoras y todo lo que se pueda relacionar con ellas. (Domínguez, 2015)

2.1.1 Hardware

La Raspberry pi presenta varios componentes básicos, uno de los principales componentes es su procesador Broadcom BCM2835 para aplicaciones multimedia, empleado en dispositivos móviles e integrados, además cuenta con componentes para el almacenamiento como son tarjetas USB, RCA Y SD. En la figura 2.1 se muestran los componentes básicos que tiene la Raspberry PI.

Figura 2.1 Componentes básicos Raspberry Pi



Fuente: (Dennis, 2013)

Las dimensiones que presenta la Raspberry es aproximadamente de 8,5 cm x 5,6 mm este el caso de modelo 2B, con un peso aproximado de 45 gramos, esto varia en placas anteriores. (Dennis, 2013)

Nota: Para el desarrollo del presente trabajo de titulación se utilizará el RPI 2 modelo B, esto por petición de la empresa y por las características que son indispensables para el desarrollo del proyecto.

Uno de los principales componentes que tiene la Raspberry Pi sea el modelo que tengamos, es el bus de expansión GPIO o también llamado el puerto GPIO (General Purpose Input/Output), cada uno de estos pines GPIO pueden ser tranquilamente programados con Python y poder realizar diversas tareas, desde tan sencillas como encender un Led

Se debe tomar en cuenta que cada uno de estos pines tiene un voltaje de trabajo de 3,3 voltios que me especifica un uno lógico, y 0 voltios para un cero lógico, además la corriente máxima que puede suministrar cada uno de ellos es de 16 mA. En la figura 2.2 se muestra como están distribuidos los pines GPIO. (Barnes, 2015)

Figura 2.2 Distribución pines GPIO



Fuente: (Barnes, 2015, pág. 13)

2.1.2 Software

La Raspberry PI se ejecuta mediante el sistema operativo de GNU/Linux que es software

libre. Existen algunas versiones de Linux que se conocen como distribuciones, y pueden ser utilizadas en la tarjeta. Entre ellas se tiene:

- Raspbian OS
- RISC OS
- Arch Linux
- Pidora
- OpenELEC

Cada una de estas plataformas cuentan con diferentes características, uno de los más utilizados es Raspbian OS, porque la distribución permite moverse con facilidad en el hardware de la Raspberry PI, ya que cuenta con el IDLE para Python el cual permite realizar configuraciones de la tarjeta, además su instalación es sencilla. (Domínguez, 2015)

Para el presente prototipo se utilizará la versión Raspbian OS. En este software se realizará la programación necesaria junto con el lenguaje de programación Python.

2.2 Controladores industriales

Para elegir adecuadamente el tipo de controlador a implementarse en una planta se debe tener en cuenta las condiciones de operación e incluir las consideraciones adicionales (seguridad, costo, fiabilidad, precisión, etc.), que ayudarán a elegir los mejores elementos para la implementación de un controlador industrial.

En la industria se tiene diferentes clasificaciones de controladores, según el tipo de energía empleado como son: energía neumática, hidráulica o eléctrica, o por su acción de control.

Según (Ogata, 2010), tenemos los siguientes tipos de controladores.

2.2.1 Acción de control de dos posiciones o de encendido y apagado (on/off)

De manera relativa, es el controlador más sencillo y económico, pues los actuadores tienen dos posiciones fijas, que en su mayoría son solo de encendido y apagado.

Si decimos que la señal de salida del controlador es $u(t)$ y que la señal de error es $e(t)$, entonces, para este tipo de controladores, la señal $u(t)$ permanece constante en su valor (máximo o mínimo), dependiendo si $e(t)$ es positiva o negativa.

$$u(t) = U_1 \quad \text{para } e(t) > 0 \quad (2.1)$$

$$U_2 \quad \text{para } e(t) < 0 \quad (2.2)$$

Donde U_1 y U_2 son valores fijos y por lo general U_2 es cero o $-U_1$.

2.2.2 Acción de control proporcional

Un controlador proporcional básicamente es un amplificador con una ganancia ajustable. En este tipo de controladores existe una relación entre la salida del controlador $u(t)$ y que la señal de error $e(t)$, la cual viene dada por:

$$u(t) = K_p e(t) \quad (2.3)$$

Donde K_p es un valor real y se lo conoce como ganancia proporcional y su función de transferencia obtenida por el método de Laplace es:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \quad (2.4)$$

2.2.3 Acción de control integral

Un controlador integral, se denomina control de reajuste y tiene el propósito de disminuir o eliminar el error en estado estacionario.

La salida del controlador $u(t)$ es una razón proporcional a la señal de error $e(t)$, la cual se puede expresar como:

$$\frac{du(t)}{dt} = K_i e(t) \quad \text{o} \quad u(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (2.5)$$

Donde K_i es un valor variable y se lo conoce como ganancia integral y su función de transferencia:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s} \quad (2.6)$$

2.2.4 Acción de control proporcional-integral

Un controlador proporcional integral, introduce un cero al sistema y un polo en el origen, por lo que el orden del sistema aumenta en 1. Mejorando el error en estado estable.

Estos controladores son la mezcla entre los dos anteriores el cual viene definido por:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad (2.7)$$

Donde T_i se lo conoce como tiempo integral y su función de transferencia:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right) \quad (2.8)$$

2.2.5 Acción de control proporcional-derivativa

Un controlador derivativo, no altera el orden del sistema. Mejorando el estado transitorio.

La acción de control de estos controladores se puede expresar como:

$$u(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.9)$$

Donde T_d se lo conoce como tiempo derivativo y su función de transferencia viene dada por:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p (1 + T_d s) \quad (2.10)$$

2.2.6 Acción de control proporcional-integral-derivativa

Este tipo de controladores reúnen las ventajas de las tres acciones de control individuales, pues es una combinación de estas y su ecuación viene dada por:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.11)$$

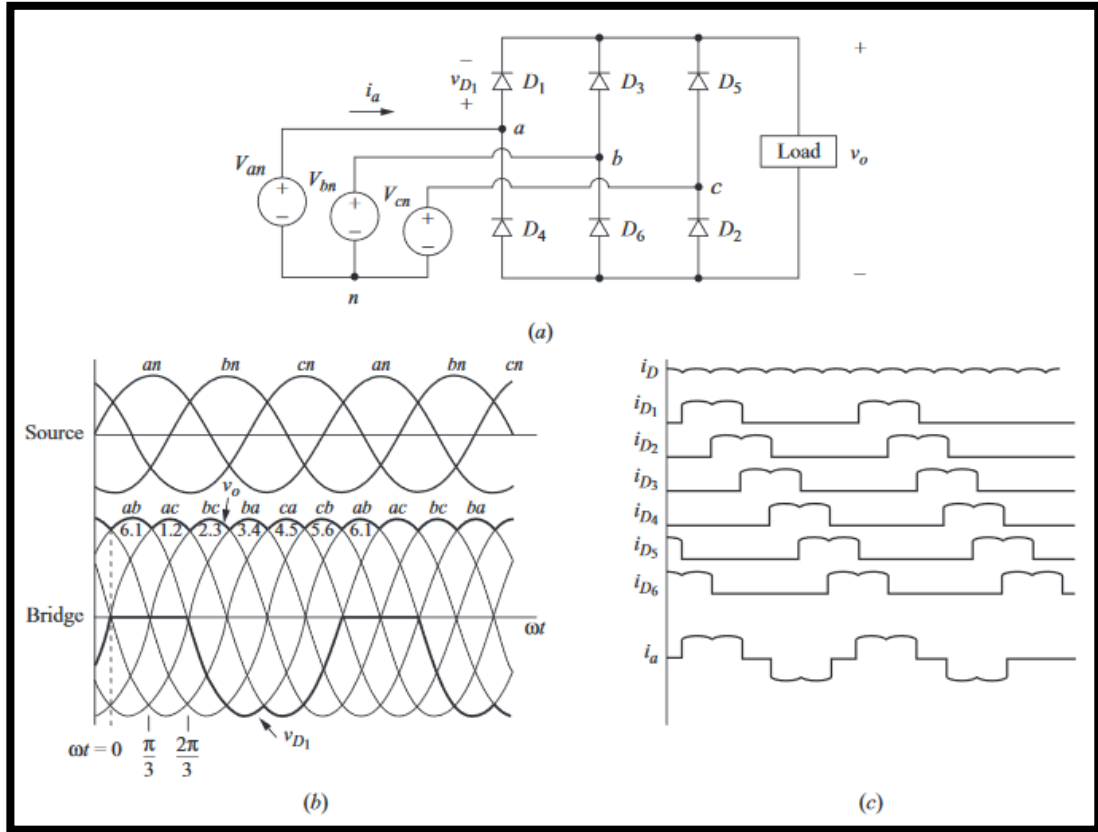
Donde K_p es la ganancia proporcional, T_i es el tiempo integral y T_d es el tiempo derivativo y su función de transferencia es:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (2.12)$$

2.3 Rectificadores trifásicos

Este tipo de rectificadores comúnmente se utiliza en la industria en donde se generan grandes tensiones para grandes cargas, en la figura 2.3 se presenta el esquema de un rectificador trifásico, así como las señales de onda que se generan tanto en el generador como las tensiones de salida y las corrientes para una carga resistiva. (Hart, 2011)

Figura 2.3 a) Rectificador trifásico tipo puente b) Voltaje del generador y salida c) Corrientes carga resistiva



Fuente: (Hart, 2011, pág. 144)

En este caso cada diodo conduce una tercera parte del tiempo en donde se tiene la siguiente expresión:

$$\begin{aligned}
 I_{D,avg} &= \frac{1}{3} I_{o,avg} \\
 I_{D,avg} &= \frac{1}{\sqrt{3}} I_{o,rms} \\
 I_{s,rms} &= \sqrt{\frac{2}{3}} I_{o,rms}
 \end{aligned}
 \tag{2.13}$$

Donde la potencia aparente del generador es:

$$S = \sqrt{3} V_{L-l,rms} I_{s,rms}
 \tag{2.14}$$

Teniendo también el valor de voltaje dc de salida expresado de la siguiente manera:

$$V_o = \frac{1}{\pi/3} \int_{\pi/3}^{\frac{2\pi}{3}} V_{m,L-L} \sin(wt) d(wt) = \frac{3V_{m,L-L}}{\pi} = 0,955V_{m,L-L} \quad (2.15)$$

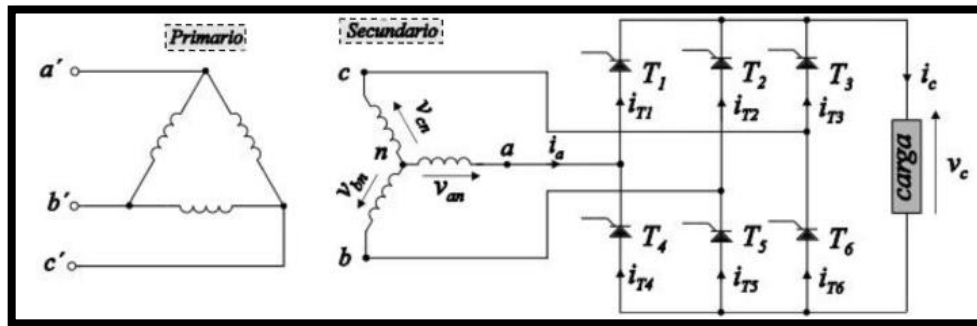
Y la expresión para el voltaje generado en alterna seria:

$$V_n = \frac{6V_{m,L-L}}{\pi(n^2 - 1)} \quad n = 6, 12, 18 \dots \quad (2.16)$$

2.3.1 Rectificadores trifásicos controlados

Con este tipo de rectificadores se puede controlar el valor de voltaje en la salida, sustituyendo a los diodos por SCRs. Mediante esta configuración si no existe una señal de puerta en el SCR el SCR no conduce ya que permanece en polarización inversa, con esto se puede retrasar la transición de voltaje de salida del generador. Esta transición se la representa como el ángulo de disparo (α), que es el intervalo entre cuando se polariza directamente al SCR y el momento de aplicación de la señal. En la figura 2.4 se muestra la configuración del rectificador trifásico controlado. (Hart, 2011)

Figura 2.4 Esquema rectificador trifásico controlado



Fuente: (Juan Aguilar; Francisco Martinez; Catalina Rus Casas, 2015, pág. 109)

Donde el voltaje medio de salida es:

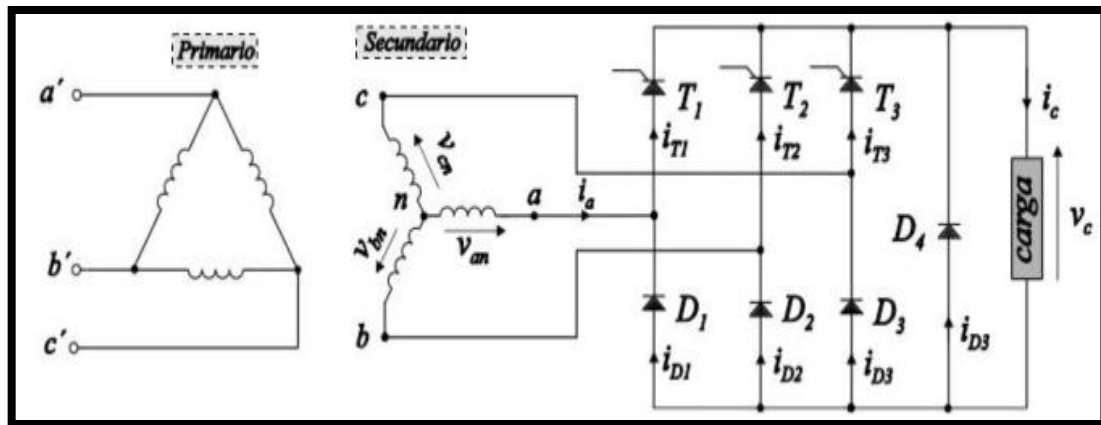
$$V_o = \frac{1}{\pi/3} \int_{\pi/3+\alpha}^{\frac{2\pi}{3}+\alpha} V_{m,L-L} \sin(wt) d(wt) = \left(\frac{3V_{m,L-L}}{\pi} \right) \cos \alpha \quad (2.27)$$

2.3.2 Puente rectificador trifásico semicontrolado

En el rectificador semicontrolado se sustituye tres tiristores por tres diodos, esto ayuda a eliminar voltajes negativos generados por un rectificador trifásico totalmente controlado, esto únicamente al utilizar cargas altamente inductivas.

En la figura 2.5 se muestra el esquema del rectificador trifásico semicontrolado, donde como se mencionó antes se encuentra conformado por tres diodos y tres tiristores y un diodo D4 de libre circulación.

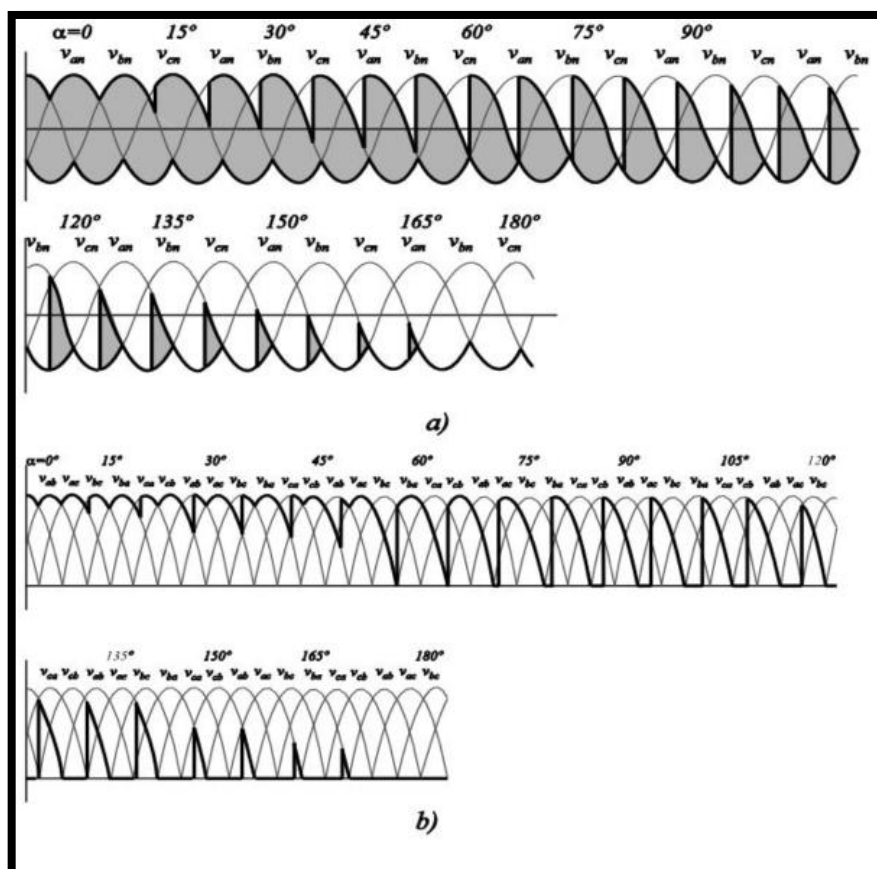
Figura 2.5 Esquema puente rectificador trifásico semicontrolado



Fuente: (Juan Aguilar; Francisco Martinez; Catalina Rus Casas, 2015, pág. 120)

A continuación en la figura 2.6 tenemos una comparación entre las señales de salida obtenidas para un rectificador trifásico de onda completa totalmente controlado y semicontrolado según el ángulo de disparo que se le asigne a cada tiristor.

Figura 2.6 Comparación del voltaje de salida suministrado a la carga a) puente rectificador trifásico totalmente controlado b) puente rectificador trifásico semicontrolado

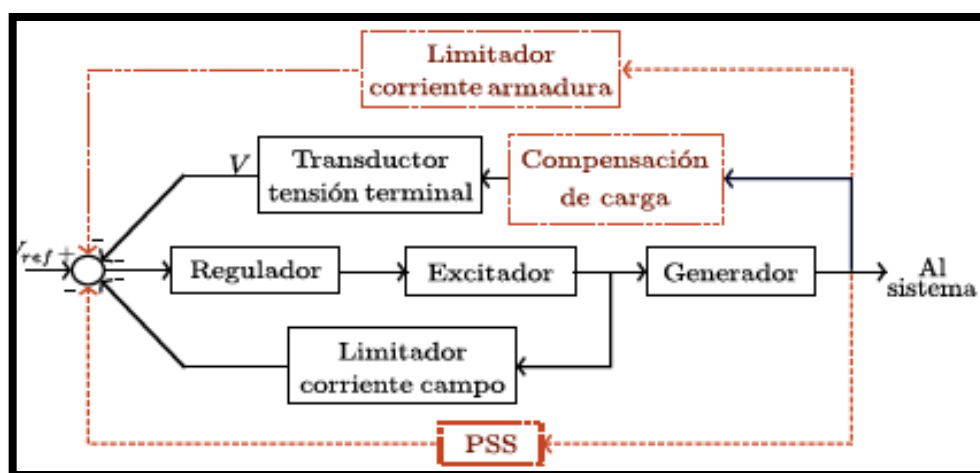


Fuente: (Juan Aguilar; Francisco Martinez; Catalina Rus Casas, 2015, págs. 120,121)

2.4 Reguladores automáticos de voltaje (AVR)

La principal función que cumple un AVR es como su nombre lo explica, se encarga de la regulación de voltaje en los terminales del generador, esto siempre y cuando las diferentes variables que se presentan como son: corriente, potencia activa y reactiva se mantengan dentro de los parámetros del diseño, a su vez un AVR debe ser confiable, es decir que debe tener sus respectivas protecciones en caso de fallo. Así como un lazo de redundancia dentro del esquema de control. (Ramírez, 2013)

Figura 2.7 Caracterización del sistema de control automático



Fuente: (Ramírez, 2013, pág. 12)

En la figura 2.7 se muestra los componentes principales del AVR como son: un regulador, un excitador, un transductor, un compensador de carga y el estabilizador de potencia del sistema, además constan los circuitos de protección para la máquina, y lazo realimentado en el cual se tiene un voltaje de referencia, esto para la regulación y poder realizar la variación dependiendo del comportamiento del generador.

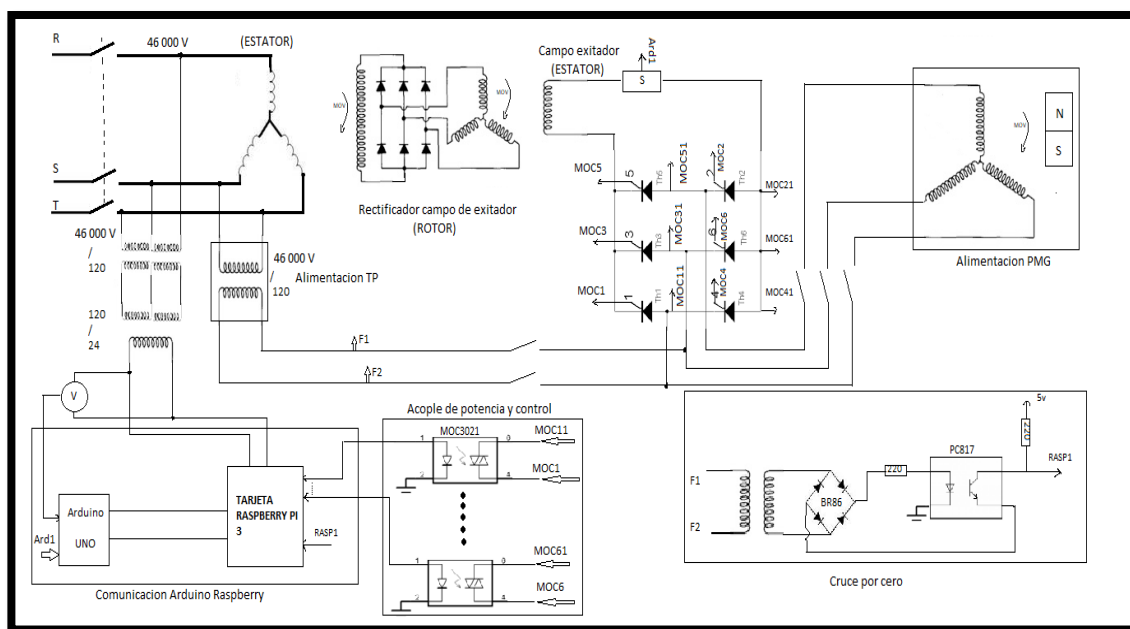
CAPÍTULO 3

DISEÑO

En este capítulo se presenta los diseños eléctricos para la realización del proyecto, con sus diferentes simulaciones, que cuentan con los dispositivos que serán implementados. A su vez se detalla el diseño completo de la planta en general.

En la figura 3.1 se presenta la descripción del sistema, con el objetivo de controlar un generador eléctrico en la Central Termoeléctrica de Guangopolo, y posteriormente se analiza cada sección detallada en el esquema.

Figura 3.1 Caracterización general del sistema de control automático



Esquema general del sistema, Kevin Salazar, Fernando Montesdeoca

3.1 Materiales a utilizar

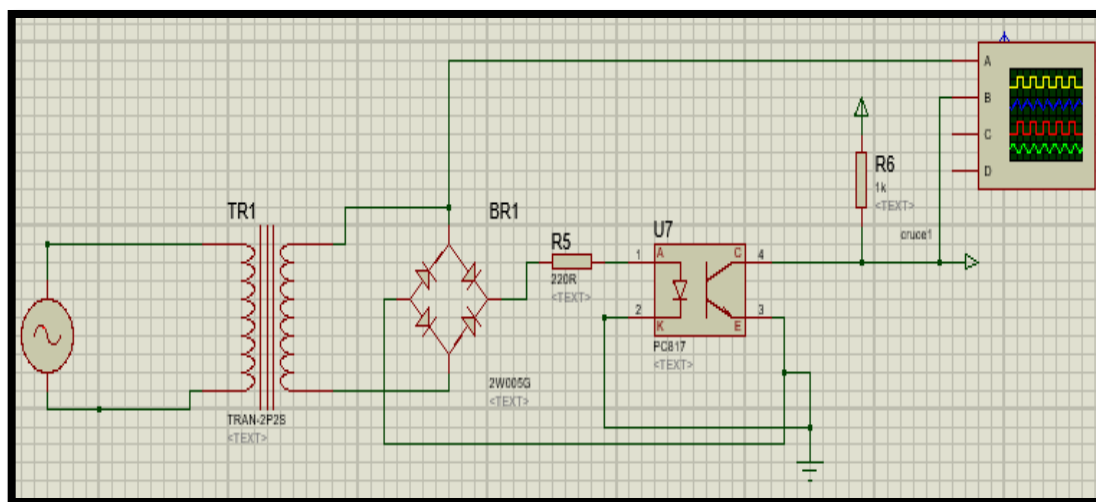
- Raspberry Pi 3
- Optoacoplador MOC 3021
- Optoacoplador PC817
- Puente de diodos BR86
- SCR TIC 116D

- Arduino nano
- Transformador 10:1
- Resistencias varias

3.2 Circuito cruce por cero

Como primera parte para el control de velocidad del generador, se deberá realizar un circuito cruce por cero, en donde este detecte cuando la onda sinusoidal llega a cero voltios generando un pulso de 5 voltios, cuando este es generado ingresa por uno de los pines de interrupción del Arduino y se realiza el posterior control mediante la Raspberry controlando así el ángulo de disparo de cada SCR. En la figura 3.2 se presenta el circuito cruce por cero.

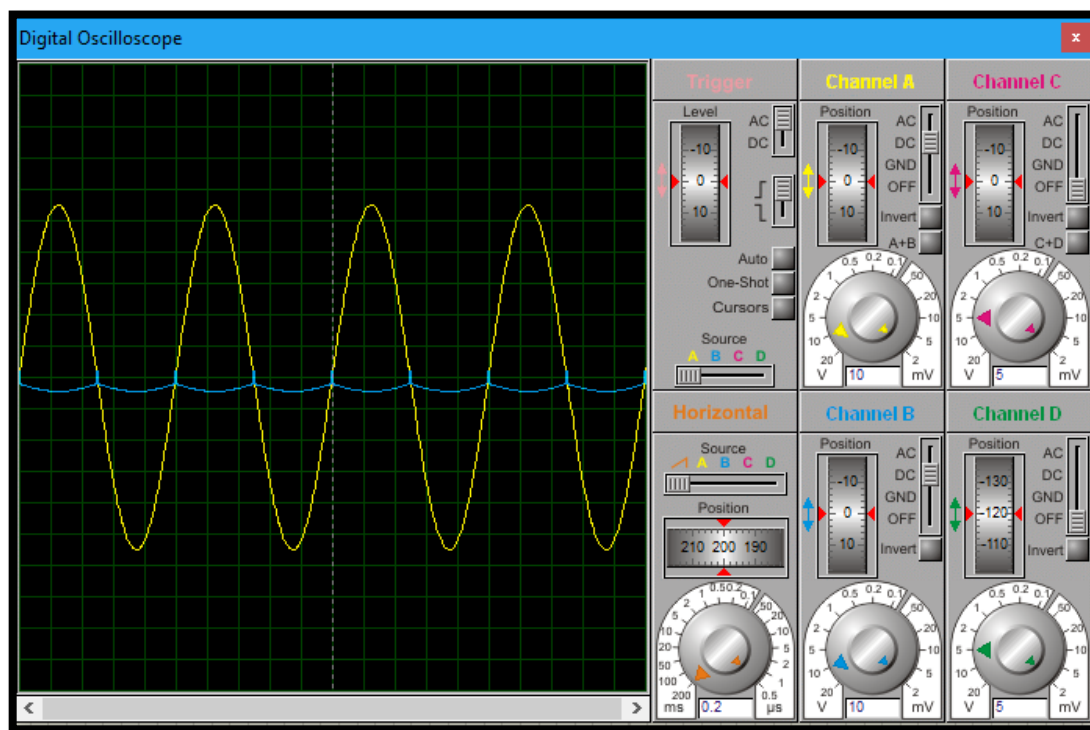
Figura 3.2 Circuito cruce por cero



Circuito cruce por cero, Kevin Salazar, Fernando Montesdeoca

Como se puede ver en la figura 3.2 se utiliza como primera parte un transformador 10:1, el cual se encarga de reducir el voltaje de entrada, de 120 voltios a 12 voltios. Luego se pasa a la etapa de rectificación esto mediante un puente de diodos que simplemente realiza la conversión de corriente alterna a corriente continua, para que finalmente llegue a un opto-acoplador PC817 el cual aísla las dos etapas del circuito, y realiza la secuencia de pulsos que se envían al controlador. En la figura 3.3 se muestra los pulsos generadores del circuito en conjunto con la onda sinusoidal.

Figura 3.3 Simulación circuito cruce por cero



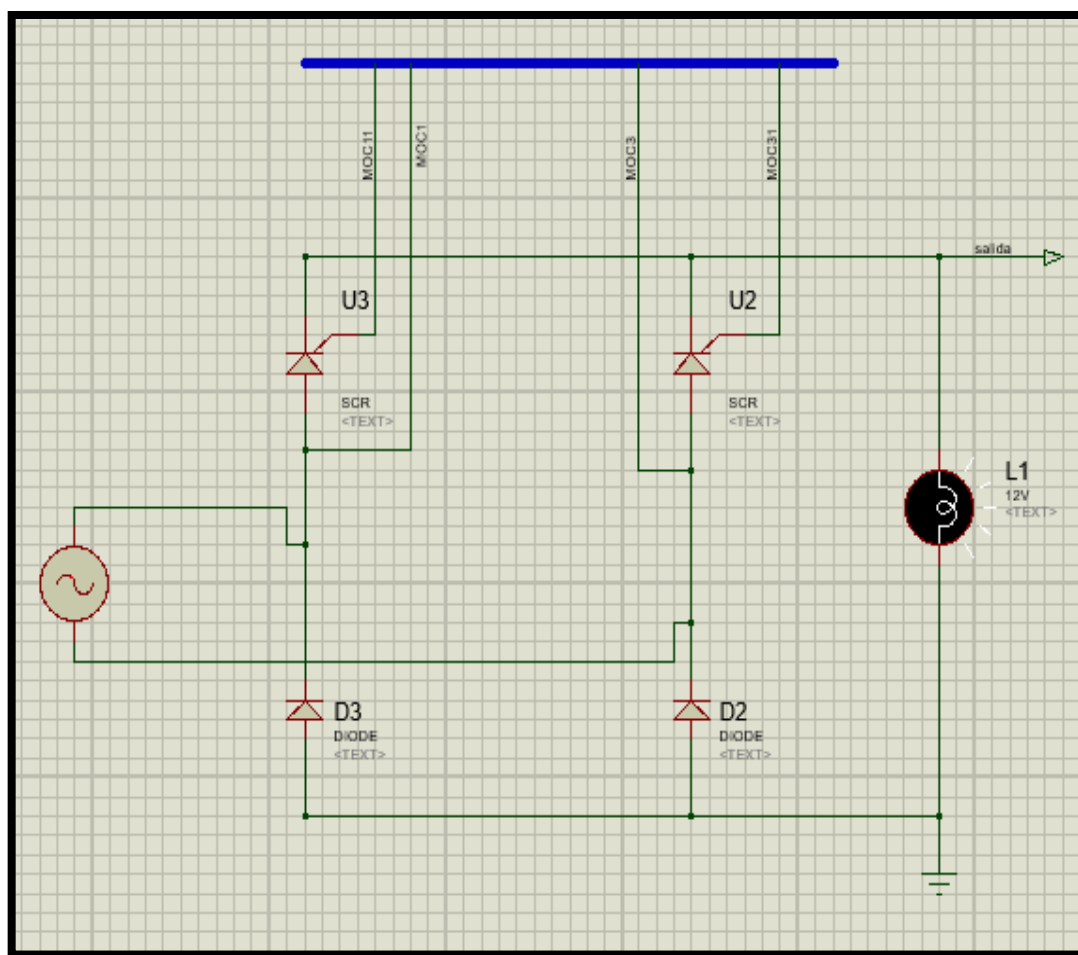
Simulación cruce por cero, Kevin Salazar, Fernando Montesdeoca

3.3 Circuito rectificador

En la figura 3.4 se observa el circuito de la etapa de rectificación, que se encarga del control de la salida de voltaje a la carga.

Para la simulación se utilizara el SCR S6035J que controla la salida de voltaje en la carga, trabajaran en conjunto con diodos rectificadores que de igual manera ayudan a esta etapa.

Figura 3.4 Etapa de rectificación

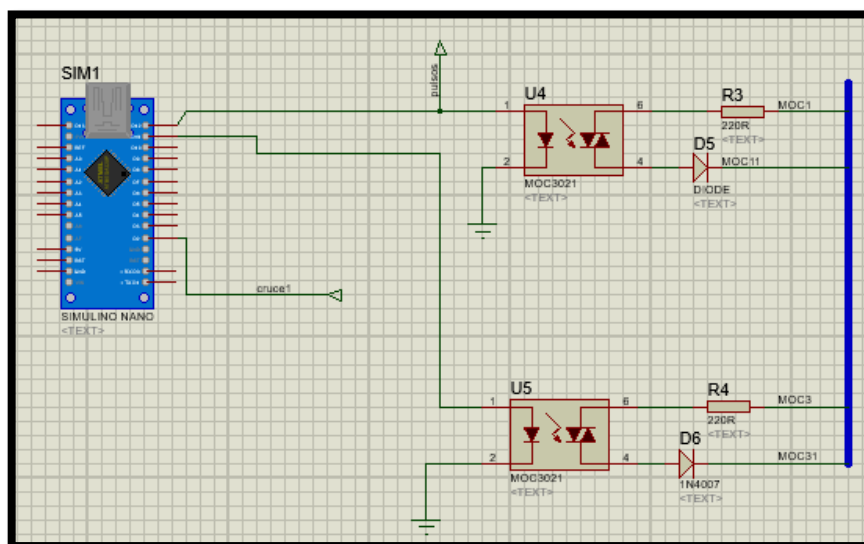


Circuito de potencia etapa de rectificación, Kevin Salazar, Fernando Montesdeoca

3.4 Acople de potencia y control

Es necesario usar una etapa de protección para separar la etapa de potencia de la de control, por lo general se utilizan opto-acopladores para realizar este trabajo. El Arduino envía el pulso generado y el triac interno del opto-acoplador MOC3021 se encarga de transmitir el mismo pulso para el disparo del SCR. En la figura 3.5 se muestra un opto-acoplador MOC3021, encargado de separar la etapa de rectificación con la etapa de control.

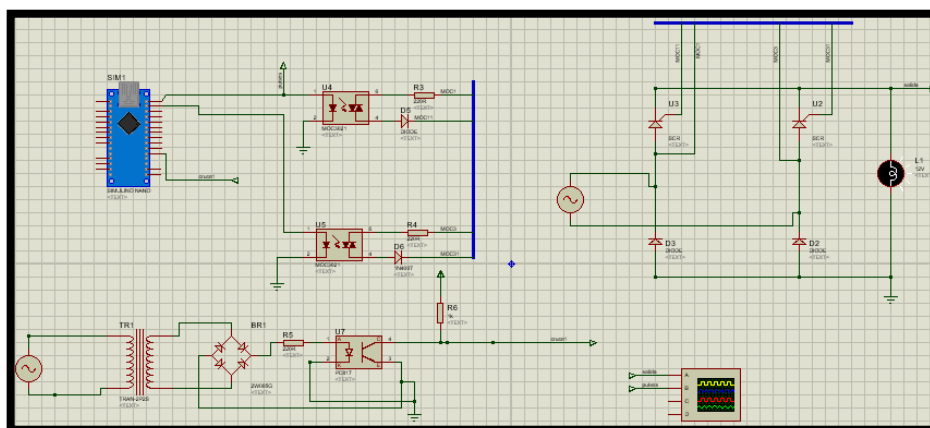
Figura 3.5 Acople de potencia y control



Acople de potencia y control, Kevin Salazar, Fernando Montesdeoca

En la figura 3.6 se muestra el circuito completo para el rectificador monofásico de onda completa controlado.

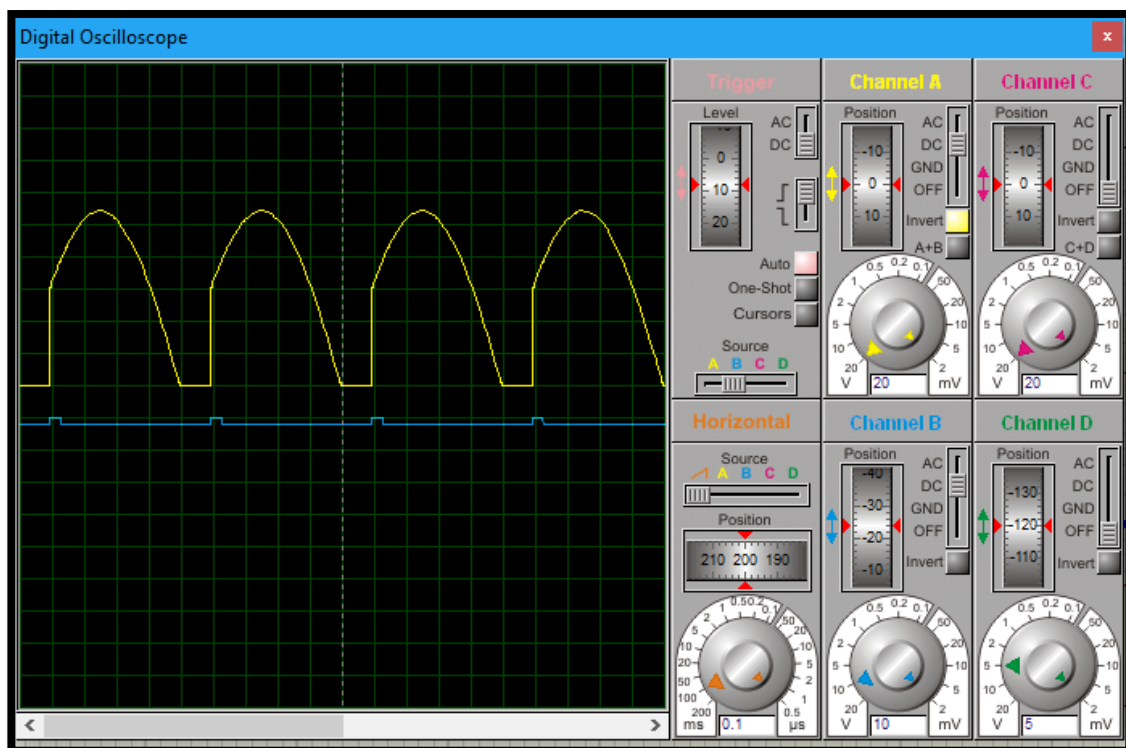
Figura 3.6 Rectificador monofásico controlado



Circuito Rectificador monofásico controlado, Kevin Salazar, Fernando Montesdeoca

En la figura 3.7 se muestra la señal de onda a la salida en conjunto con los pulsos generados del Arduino.

Figura 3.7 Señal de salida con ángulo de disparo a 30°

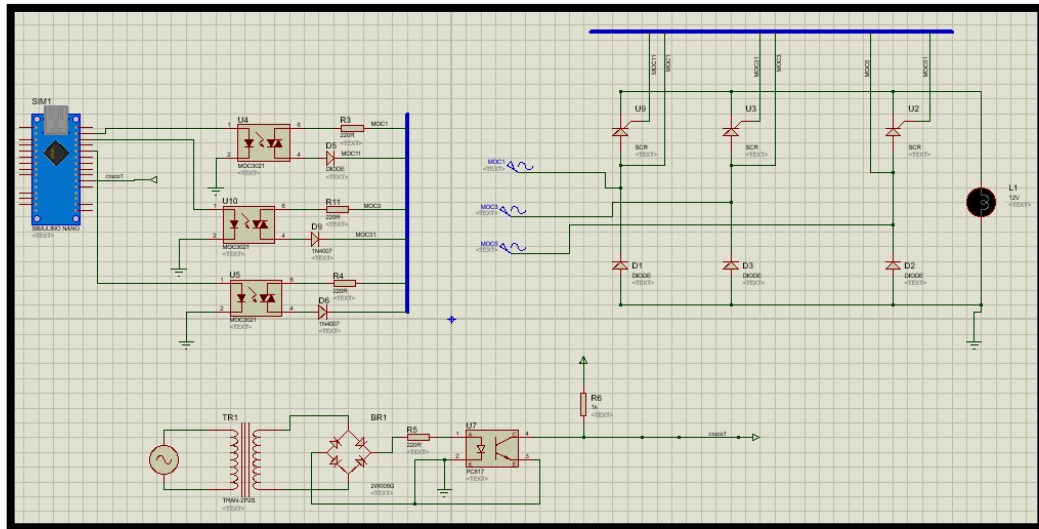


Rectificación controlada con ángulo de disparo a 30° , Kevin Salazar, Fernando Montesdeoca

El ángulo de disparo se controla mediante la Raspberry, en base al tiempo de activación del pulso. Este circuito se implementa para la alimentación monofásica TP del generador de la central termoeléctrica de Guangopolo. Para la simulación del circuito trifásico se emplea la misma idea que en el circuito monofásico, en la figura 3.8 se presenta el circuito trifásico simulado.

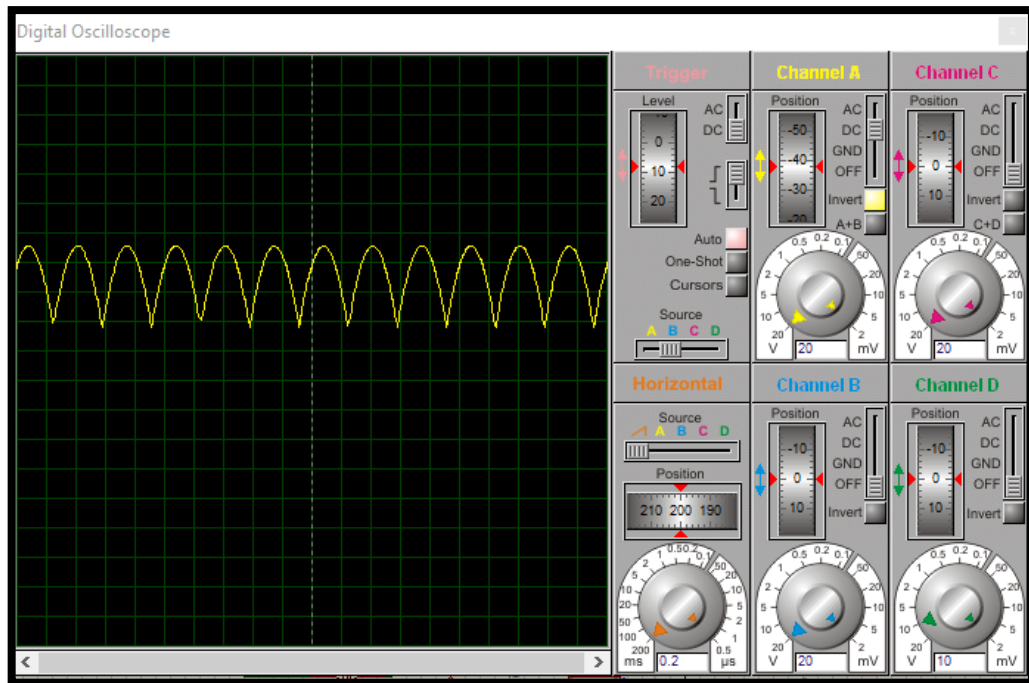
De igual manera se utiliza un Arduino para la adquisición de pulsos de cruce por cero y la secuencia de pulsos para la activación de los SCRs, en la figura 3.9 se muestra la señal rectificada del rectificador trifásico.

Figura 3.8 Circuito rectificador Trifásico



Rectificador trifásico semicontrolado, Kevin Salazar, Fernando Montesdeoca

Figura 3.9 Señal rectificada

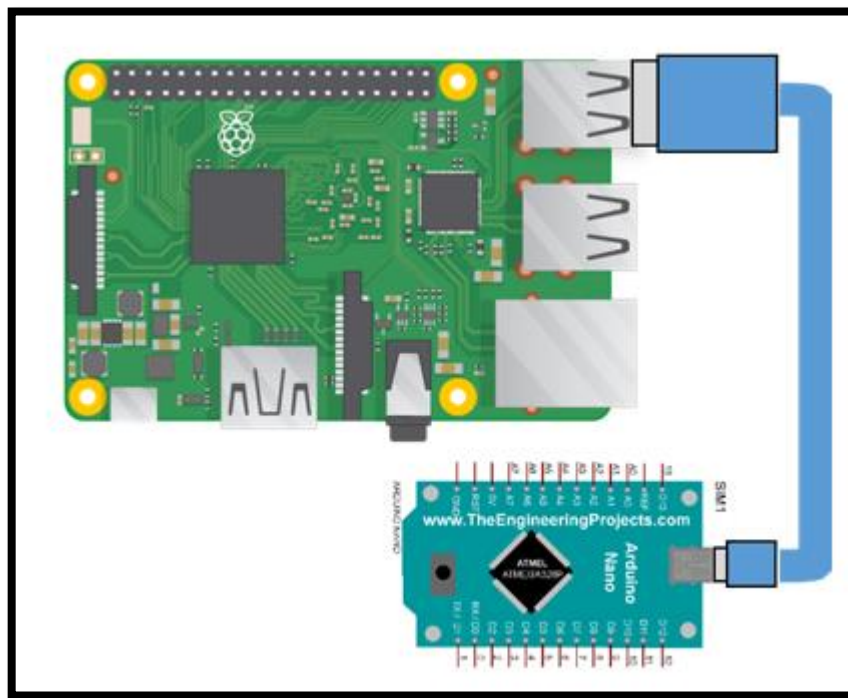


Señal rectificada del circuito trifásico, Kevin Salazar, Fernando Montesdeoca

3.5 Comunicación Arduino-Raspberry

La Raspberry Pi 3 modelo B, no cuenta con entradas análogas en sus puertos GPIO, y se deberían utilizar convertidores análogos digitales (ADC) para la adquisición de señales de los sensores, y se utilizarían muchos pines digitales de los puertos GPIO, motivo por lo cual se utiliza un Arduino Nano el cual cuenta con 8 entradas análogas y mediante comunicación serial envía los datos de los sensores hacia la Raspberry, funcionando el Arduino Nano únicamente como una tarjeta de adquisición de datos.

Figura 3.10 Comunicación Arduino-Raspberry

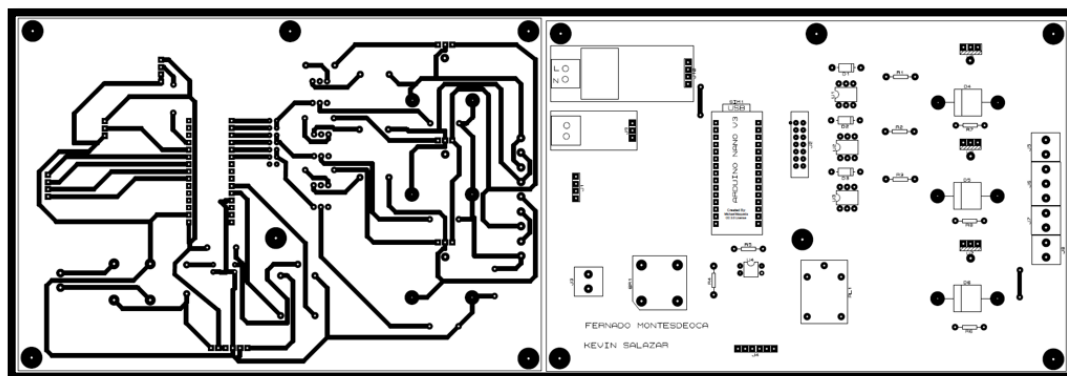


Comunicación serial entre Arduino y Raspberry, Kevin Salazar, Fernando Montesdeoca

3.6 Diseño y construcción pcb

En la figura 4.1 se presenta el diseño de la placa PCB, que usaremos en el prototipo AVR, la cual consta de un Arduino y dos sensores (sensor de voltaje AC y corriente), un circuito cruce por cero y un convertidor semicontrolado trifásico.

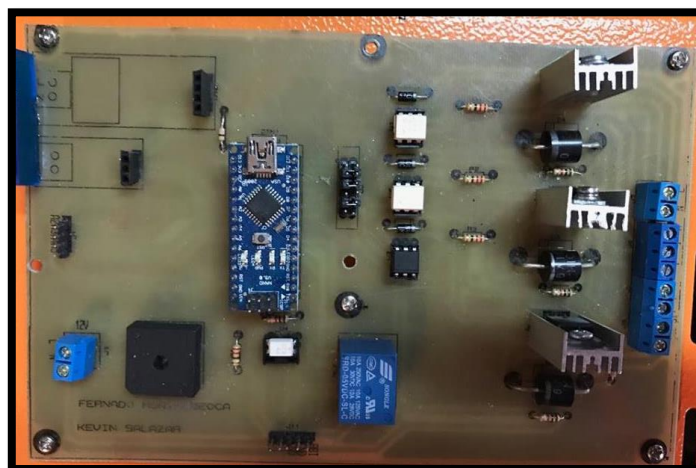
Figura 3.11 Diseño PCB



Diseño PCB, Kevin Salazar, Fernando Montesdeoca

En la figura 4.2 se presenta la placa PCB con sus elementos finales.

Figura 3.12 Placa terminada



Placa PCB terminada con sus elementos, Kevin Salazar, Fernando Montesdeoca

CAPÍTULO 4

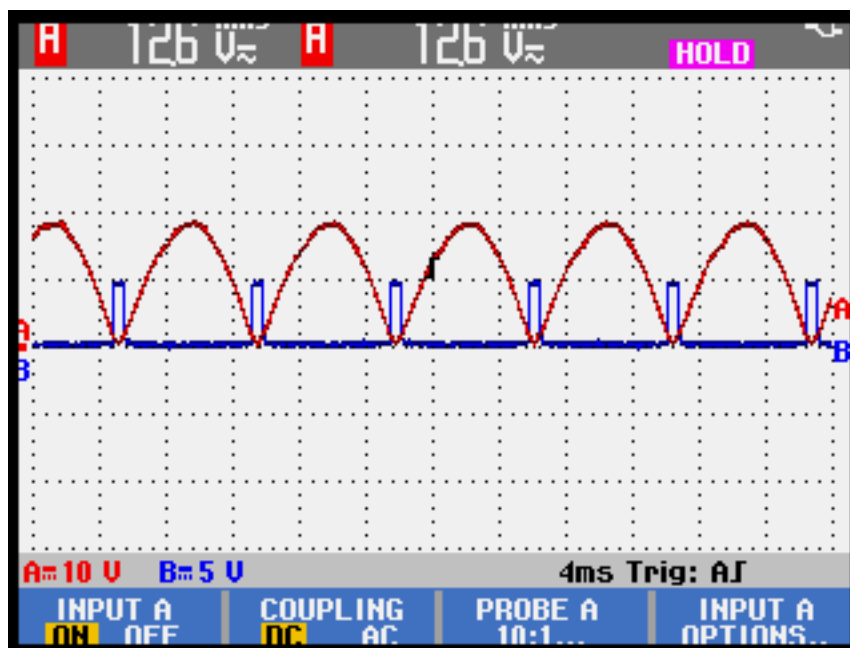
Pruebas y resultados

En este capítulo se presenta los resultados obtenidos en base a la implantación, pruebas de la PCB terminada, envío y recepción de datos Raspberry-Arduino, comportamiento del controlador PID aplicado y funcionamiento en conjunto con la planta.

4.1 Pruebas pcb

En la figura 4.1 se muestra los pulsos generados por el circuito cruce por cero, implementado en la placa PCB, los cuales son enviados hacia el Arduino para los diferentes disparos de los SCRs.

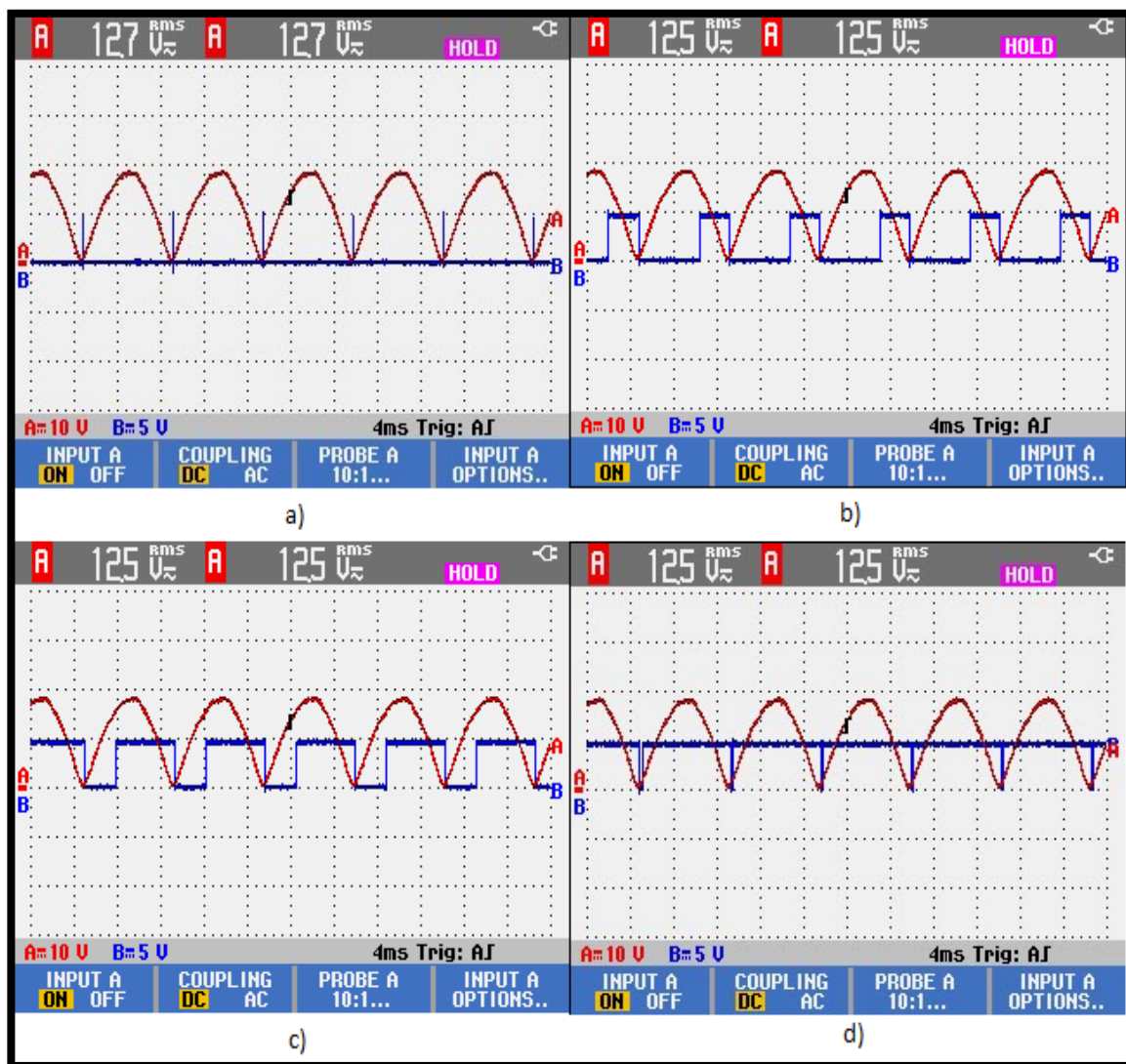
Figura 4.1 Pulsos generados circuito cruce por cero



Pulsos generados por el circuito cruce por cero de la señal de entrada, Kevin Salazar, Fernando Montesdeoca

En la figura 4.2 tenemos los pulsos generados por el Arduino, que son enviados a cada compuerta de los SCRs, generando el ángulo de disparo de cada SCR, permitiendo la activación o desactivación de los mismos.

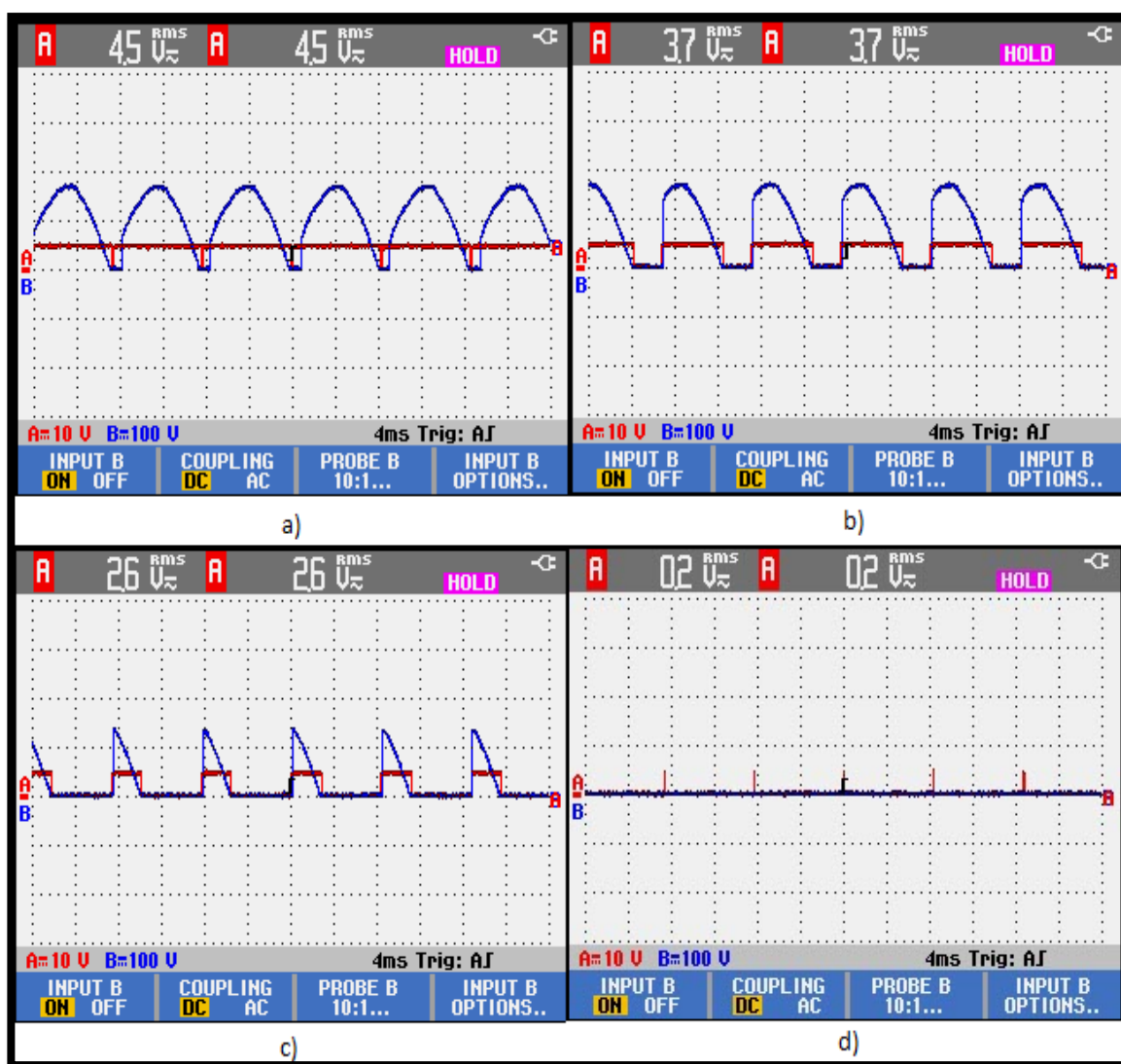
Figura 4.2 Ángulo de disparo SCR a) 180° b) 120° c) 30° d) 0°



Señal enviada del Arduino al SCR, Kevin Salazar, Fernando Montesdeoca

Para finalizar las pruebas en la PCB, en la figura 4.3 se muestran las señales de salida, esto para el circuito monofásico.

Figura 4.3 Señal de salida a) $\alpha=0^\circ$ b) $\alpha=30^\circ$ c) $\alpha=120^\circ$ d) $\alpha=180^\circ$



Señal de salida con un ángulo de disparo de 30° , Kevin Salazar, Fernando Montesdeoca

4.2 Pruebas con generador en vacío y con carga

Las pruebas fueron realizadas en un Generador LEROY SOMER con las siguientes especificaciones que se muestran en la tabla 4.1, también se muestra valores de

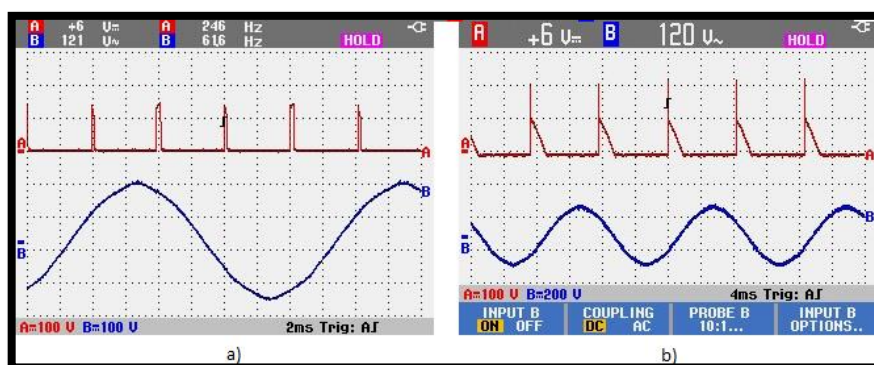
funcionamiento del AVR R250 propio del generador, con este se realizaran las comparaciones con el prototipo de esta tesis.

Tabla 4.1 Especificaciones técnicas del Generador Leroy Somer

Voltaje	208v/240v/480v según configuración delta o estrella
Corriente	220A/303A/450A según configuración delta o estrella
Potencia (kVA) máx	165 kVA
Potencia (W) máx	132 W
Factor de potencia	0.80
RPM	1500
Peso (Kg)	495 Kg
Frecuencia (Hz)	50 Hz
Valores bobina de excitación AVR full carga	36,10 V 1,96 A
Valores bobina de excitación AVR sin carga	0,56 A

En la figura 4.4 se muestra las pruebas realizadas con el generador en vacío, haciendo comparación entre la señal de salida del AVR propio del generador y el prototipo.

Figura 4.4 Señal de salida a) AVR generador b) prototipo

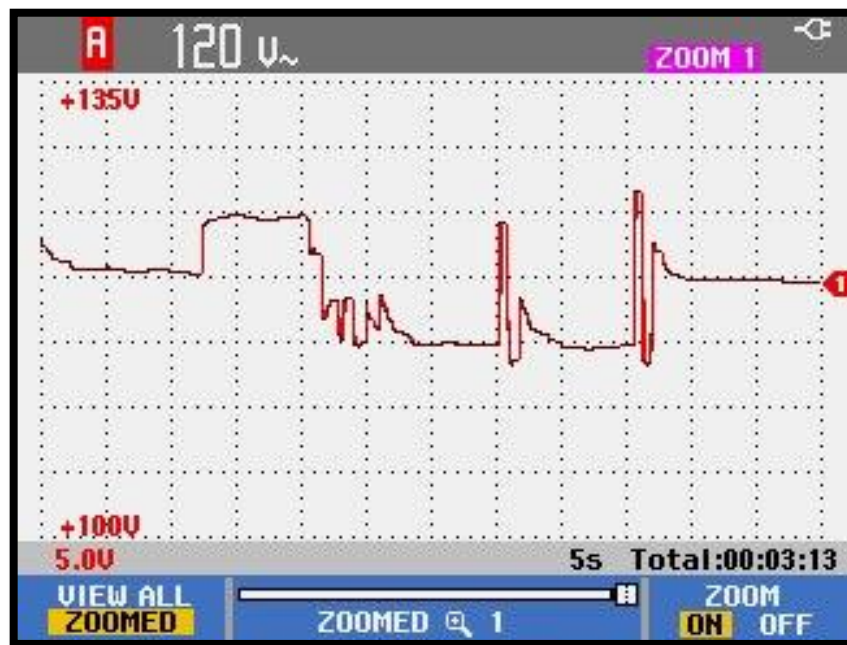


Señales de salida AVR Generador y prototipo, Kevin Salazar, Fernando Montesdeoca

En la figura 4.4 tenemos dos señales, la señal de color rojo es el voltaje DC del AVR hacia la bobina de excitación del generador y la señal de color azul es la salida de voltaje AC del generador entre línea y neutro.

En la figura 4.5 se muestra la sintonización del sistema, para obtener el voltaje deseado sin oscilaciones bruscas, para esto se varió los valores de ganancia k_p , k_d , k_i , necesarios para el control PID.

Figura 4.5 Sintonización del sistema.

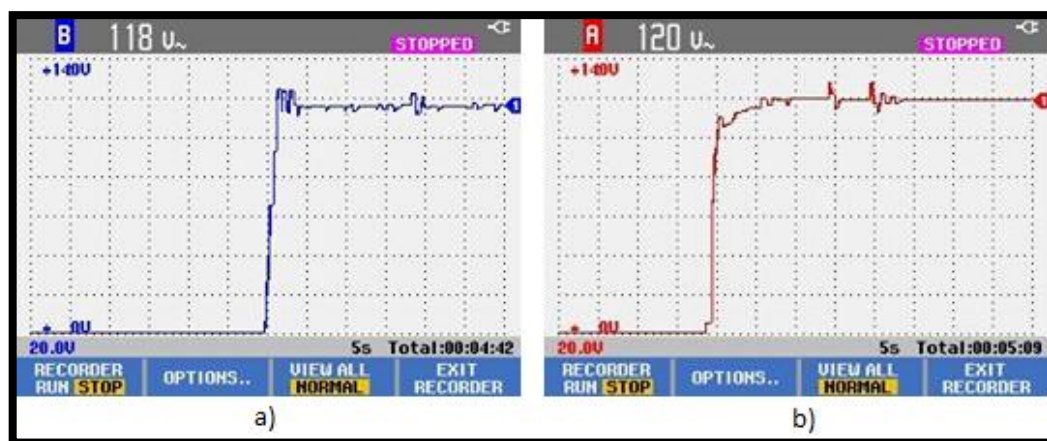


Sintonización del sistema controlador PID, Kevin Salazar, Fernando Montesdeoca

La estabilización del sistema se obtuvo con valores de $k_p=0.15$, $k_d= 0.20$, $k_i=0$. El control integral generaba oscilaciones muy bruscas, por tal razón se dejó con valor de cero, siendo solamente un control proporcional derivativo.

En la figura 4.6 se muestra la estabilización del sistema del AVR del generador y el prototipo.

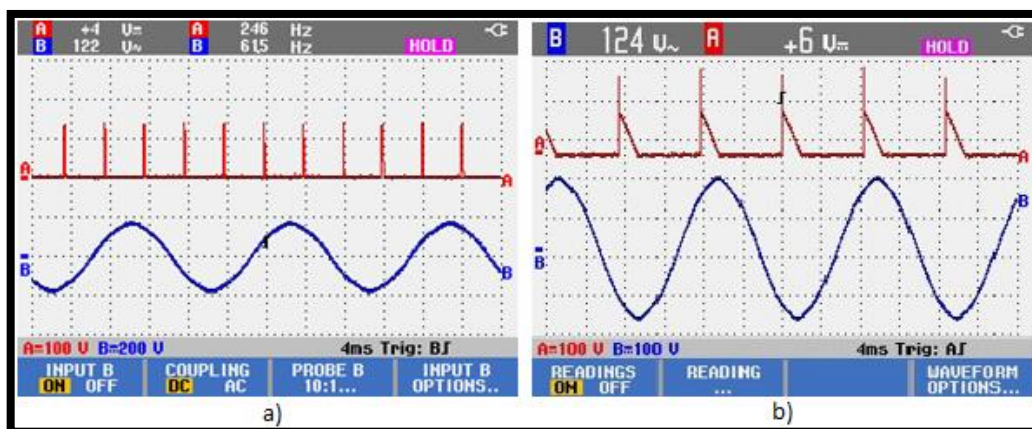
Figura 4.6 Estabilización del sistema a) AVR generador b) Prototipo



Comparación de la estabilización del sistema entre los AVR's, Kevin Salazar, Fernando Montesdeoca

De igual manera se realizó las pruebas con el generador con carga, en la figura 4.7 se muestra la comparación entre los valores voltaje con carga entre el prototipo y el AVR del generador, en esta parte se muestra pequeños transitorios en el sistema en donde se corrigieron en base a la variación de los valores de k_p y k_d , obteniendo un resultado mejor al del AVR propio del generador.

Figura 4.7 Señales de salida a) AVR generador b) Prototipo

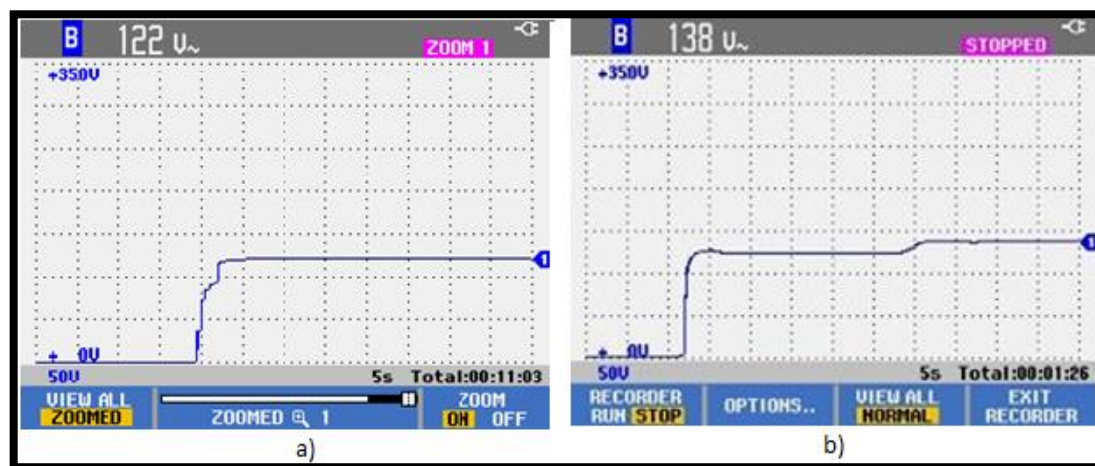


Comparación de la señal de salida AC y DC entre el AVR generador y prototipo, Kevin Salazar, Fernando Montesdeoca

En la figura 4.7 se puede ver dos señales una roja y una azul donde la roja es la señal DC del AVR hacia la bobina de excitación del generador, mientras que la azul es la señal AC que se suministra a la carga.

En la figura 4.8 se muestra la estabilización del sistema de cada AVR con carga.

Figura 4.8 Estabilización del sistema con carga a) AVR generador b) Prototipo



Comparación de la estabilización del sistema entre el AVR generador y prototipo, Kevin Salazar, Fernando Montesdeoca

En la figura 4.8b se puede ver un escalón en la señal, se realizó una variación en el voltaje de salida para observar que tiempo demora en su estabilización nuevamente, en donde se puede observar que el sistema logra estabilizarse en menos de 2 segundos según la figura. Con esto el prototipo demuestra tener un resultado como el que se esperaba, con una estabilización rápida y resultados muy buenos.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se detallará las conclusiones y recomendaciones de lo desarrollado en esta tesis, donde se presentaran los resultados obtenidos de la comparación entre el prototipo realizado y el AVR propio del generador de la Central Termoeléctrica de Guangopolo.

5.1 Conclusiones

Se desarrolló el prototipo de tarjeta para la regulación automática de voltaje, con la utilización de software y hardware libre y se empleó para el control de generadores en la unidad de negocio de CELEC EP- Termopichincha. El proyecto se entrega a satisfacción de la empresa.

Se realizó la inspección al generador Leroy Somer, se realizó su caracterización, identificando cada uno de sus componentes y sus características como se pudo ver en la tabla 4.1, además se visualizó donde se conectaría el prototipo y se realizó el diseño en base a este generador.

Se desarrolló un circuito de potencia para las características del generador. El diseño del sistema de control para la regulación automática de voltaje, se realizó con una Raspberry Pi 3 y su lenguaje de programación Python.

En el desarrollo del circuito de potencia se implementó un rectificador semicontrolado, que maneja cargas altamente inductivas (bobina de excitación de generadores) y voltajes bajos (menores a 10 voltios), en un rectificador totalmente controlado para valores del ángulo de disparo mayor a 30° no realizaba la rectificación de la parte negativa esto debido a la carga inductiva. Se empleó un rectificador semicontrolado que permita realizar el control total con voltajes siempre positivos, esto como se pudo ver en la figura 2.6 que realiza la comparación entre estos dos rectificadores.

Se implementó un sistema de control PID, donde se realizó la sintonización del sistema y se obtuvo valores de $k_p=0.15$, $k_d=0.20$ y $k_i=0$, siendo finalmente un control proporcional derivativo.

Mediante las comparaciones entre el AVR propio del generador y el prototipo, se concluyó que el prototipo tiene una respuesta igual de rápida que el AVR del generador para la regulación automática de voltaje (aproximadamente 3 segundos), también posee una mejor estabilización, sin generar muchas oscilaciones al sistema.

Se elaboró manuales técnicos y de operación, para la correcta utilización del prototipo y su esquemático de cómo están distribuido sus componentes electrónicos y todos sus parámetros necesarios para su funcionamiento.

5.2 Recomendaciones

Si el prototipo está en funcionamiento y se desea realizar algún cambio en sus conexiones, se recomienda el apagado total y desconexión del prototipo, posteriormente realizar cualquier cambio en sus componentes electrónicos o sus conexiones, siempre con la utilización del respectivo equipo de protección personal (EPP).

Si el equipo presenta oscilaciones bruscas en la regulación de voltaje, se recomienda la desconexión de la carga al generador y realizar la sintonización del sistema con el generador en vacío y posteriormente con carga si es necesario.

Si se desea realizar un cambio en el software o hardware del prototipo se recomienda que se lo haga con personal sumamente capacitado en este tema ya que es un equipo sensible y podría presentarse daños o mal funcionamiento del mismo.

Se recomienda siempre utilizar el manual de usuario y técnico para realizar cualquier prueba en el prototipo.

Referencias

- Arduino*. (2 de Mayo de 2017). Obtenido de <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction#>
- Barnes, R. (2015). *The official Raspberry PI projects book*. Recuperado el 4 de Mayo de 2017, de https://www.raspberrypi.org/magpi-issues/Projects_Book_v1.pdf
- Dennis, A. K. (2013). *Raspberry PI home Automation with Arduino*. Packt Publishing Ltd. Recuperado el 5 de Mayo de 2017, de https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=AMdyVnM9CroC&oi=fnd&pg=PT11&dq=raspberry+pi+arduino&ots=P5Iylh4boz&sig=4GQnaY_gQ_bpIf6-w1gt-XKyoqo#v=onepage&q=raspberry%20pi%20arduino&f=false
- Domínguez, C. G. (2015). *Universidad de Sevilla*. Obtenido de Aplicaciones orientadas a la domotica con Raspberry: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/90330/fichero/Memoria+TFG.pdf>
- Hart, D. W. (2011). *Power Electronics*. Madrid: McGRAW-HILL. Recuperado el 20 de Mayo de 2017, de <http://dl.offdownload.ir/ali/Power%20Electronics,Daniel%20W.%20Hart.pdf>
- Juan Aguilar; Francisco Martinez; Catalina Rus Casas. (2015). *Electronica de potencia Convertidores AC/DC*. España: Universidad de Jaén. Recuperado el 30 de Agosto de 2017, de https://issuu.com/jaguilarpena/docs/convertidores_acdc
- Matt Richardson; Shawn Wallace. (2013). *Getting Started with Raspberry*. Sebastopol: Maker media.
- Ogata, K. (2010). *Ingeniería de control moderna*. Madrid: Pearson. Recuperado el 5 de Mayo de 2017, de http://www.frenteestudiantil.com/upload/material_digital/libros_varios/control/Ingenieria%20de%20Control%20moderna%20-%20Ogata%20-%205ta.pdf
- Peñaherrera, D. A. (Agosto de 2017). *Estadística anual y multianual del Sector Electrico Ecuatoriano*. (I. n. censos, Ed.) Recuperado el 18 de Enero de 2018, de

<http://www.regulacionelectrica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2017/08/Estad%C3%ADstica-anual-y-multianual-sector-el%C3%A9ctrico-2016.pdf>

Ramírez, L. E. (2013). *Regulador de tensión en generadores síncronos para control volt/VAR en sistemas de distribución*. Universitaria "Rodrigo Facio": Universidad de Costa Rica.

ANEXOS

ANEXO 1

MANUAL TECNICO

1 INTRODUCCION

Todos los generadores de energía eléctrica necesitan el uso de Reguladores Automáticos de Voltaje (AVR), el principio básico de funcionamiento de un AVR es regular el voltaje en la bobina de excitación del generador, de modo que el voltaje generado se mantenga constante, aunque se varíe la carga.

Este AVR se encuentra construido con elementos que se pueden encontrar en el mercado local, buscando la fabricación de estos dispositivos en el país de modo que se pueda ahorrar en tiempo y dinero al momento de necesitar uno.

2 OBJETIVO

El objetivo de este manual es presentar los circuitos y esquemas de conexiones presentes en el prototipo, con el fin de que en el futuro otros ingenieros o técnicos puedan hacer modificaciones, actualizaciones o mantenimientos con la lectura e interpretación del manual.

2.1 OBJETIVO GENERAL

Este prototipo de AVR tiene el propósito de buscar el cambio de AVR's importados a altos costos y tiempos de importación elevados, por un AVR producido con elementos que se encuentren en el mercado local y con programación de software libre, de este modo se pueden realizar mejoras de acuerdo a las necesidades que se presenten en un futuro.

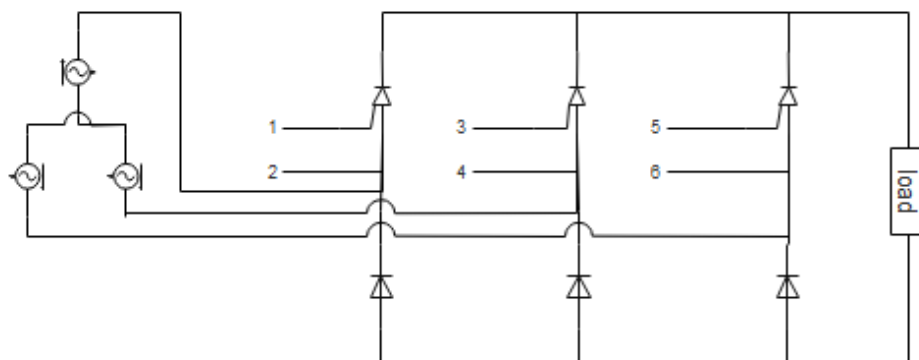
2.2 OBJETIVO DEL SISTEMA

Regular de manera automática el voltaje en la bobina de excitación de cualquier generador síncrono, de modo que sin importar la carga que maneje el generador el voltaje entregado por este siempre sea constante.

3 CIRCUITOS Y DIAGRAMAS

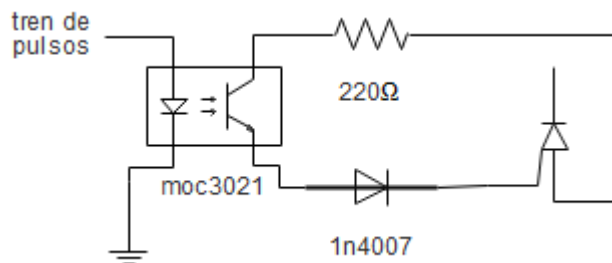
3.1 RECTIFICADOR SEMICONTROLADO DE ONDA COMPLETA

Se trata de un rectificador conformado por diodos y SCRs con el cual se controla el voltaje entregado a la bobina de excitación del generador.



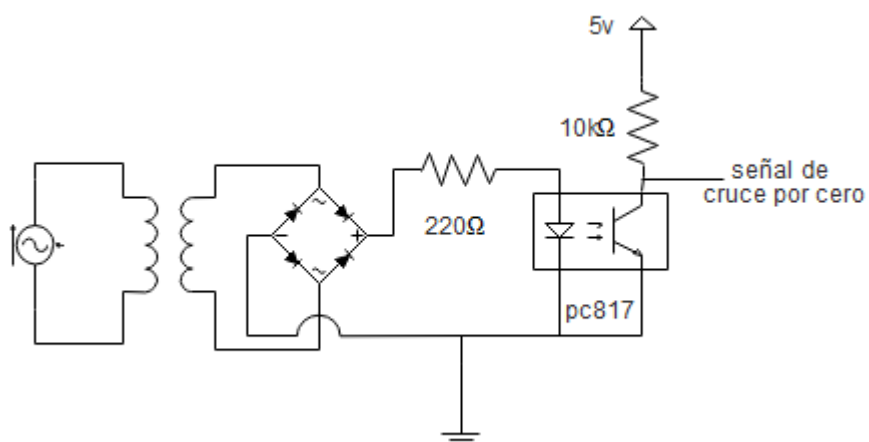
3.2 DISPARADOR DE SCR

Para el disparo de un SCR se utiliza un circuito conformado por un moc3021, una resistencia de 220Ω y un diodo 1n4007. El tren de pulsos se genera en el Arduino nano de la placa del rectificador.



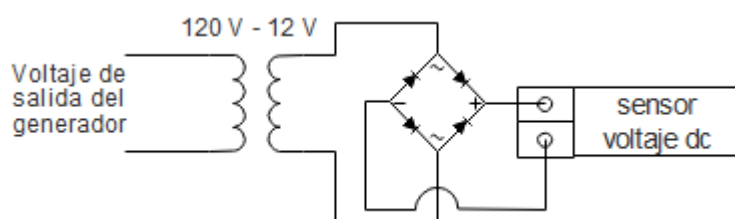
3.3 CRUCE POR CERO

Para la generación del tren de pulsos necesario para el disparador de SCR es necesario un circuito detector de cruce por cero, para lograr que la frecuencia del tren de pulsos sea igual a la señal sinusoidal a rectificar. La señal obtenida de este circuito es un pequeño pulso en cada punto donde la señal sinusoidal es 0V. Este pulso es recibido por el Arduino nano para que genere el tren de pulsos correctamente para el disparo de los SCR.



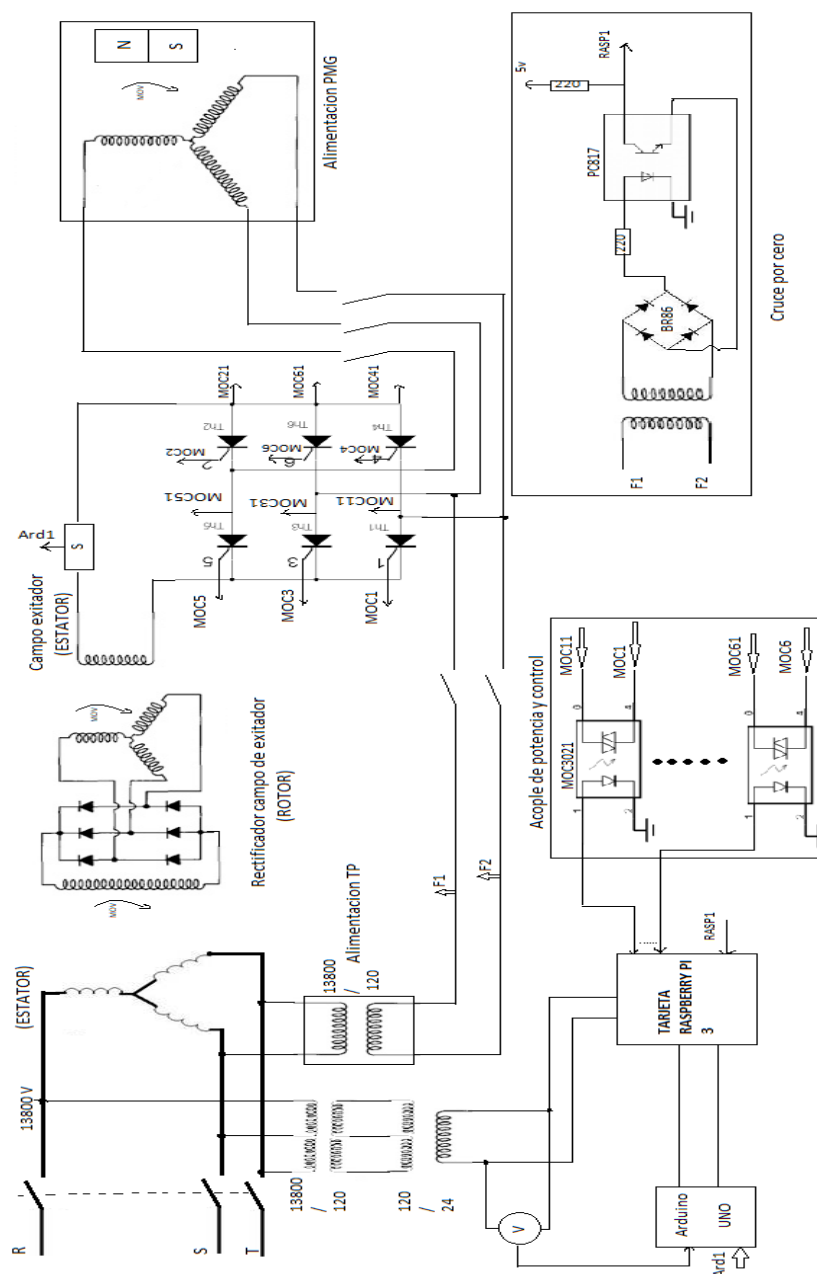
3.4 SENSADO DE VOLTAJE

Se tiene un circuito para usar un sensor de voltaje DC para poder medir el voltaje AC generado, para lo cual se usa un transformador y un puente de diodos. La lectura del sensor la realiza otro Arduino nano, en la misma placa, en una de sus entradas análogas.



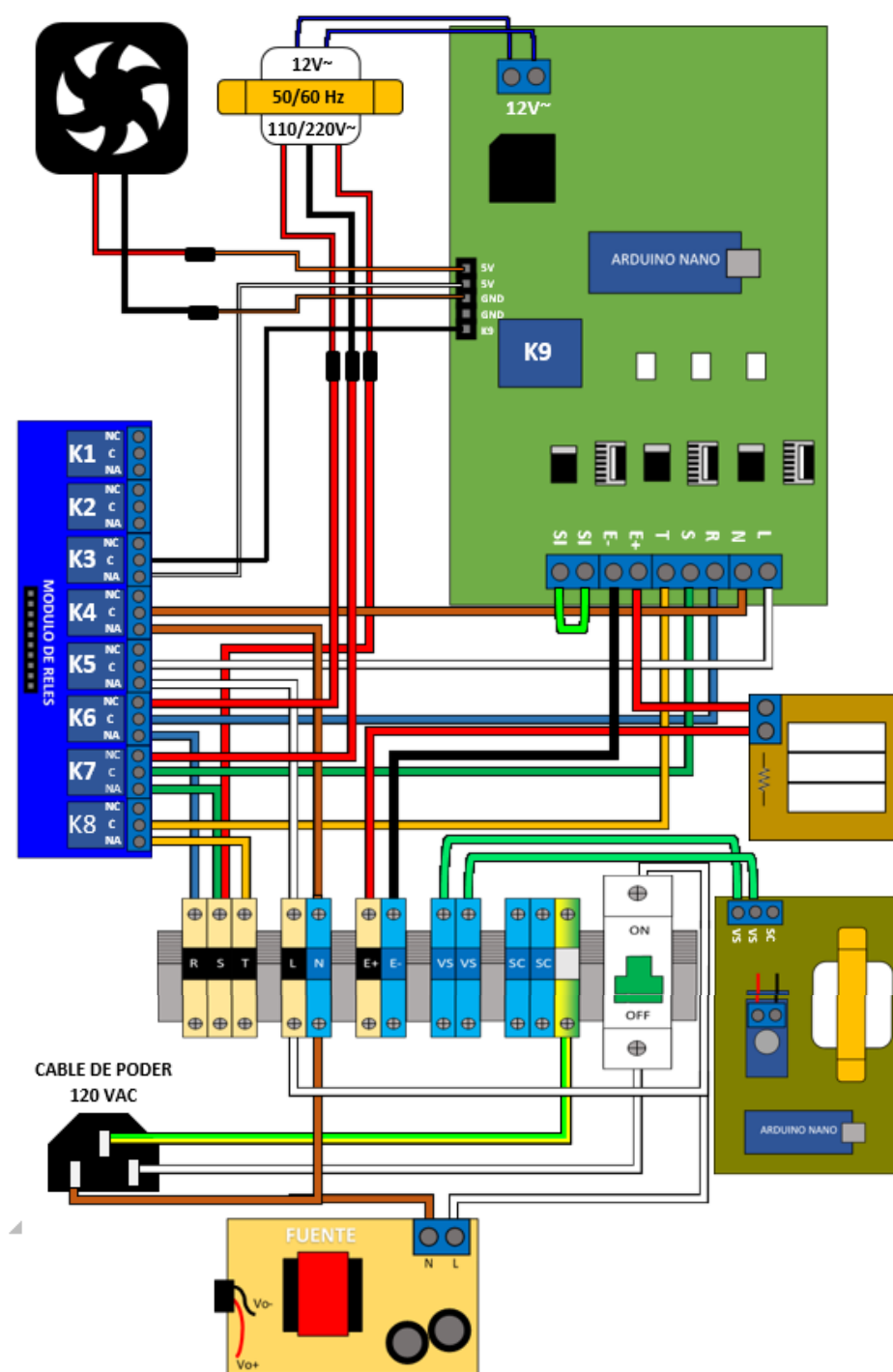
3.5 ESQUEMA GENERAL DEL SISTEMA

A continuación se presenta un esquema general, en el cual se observan los circuitos antes mencionados y cómo funcionan en conjunto con el generador



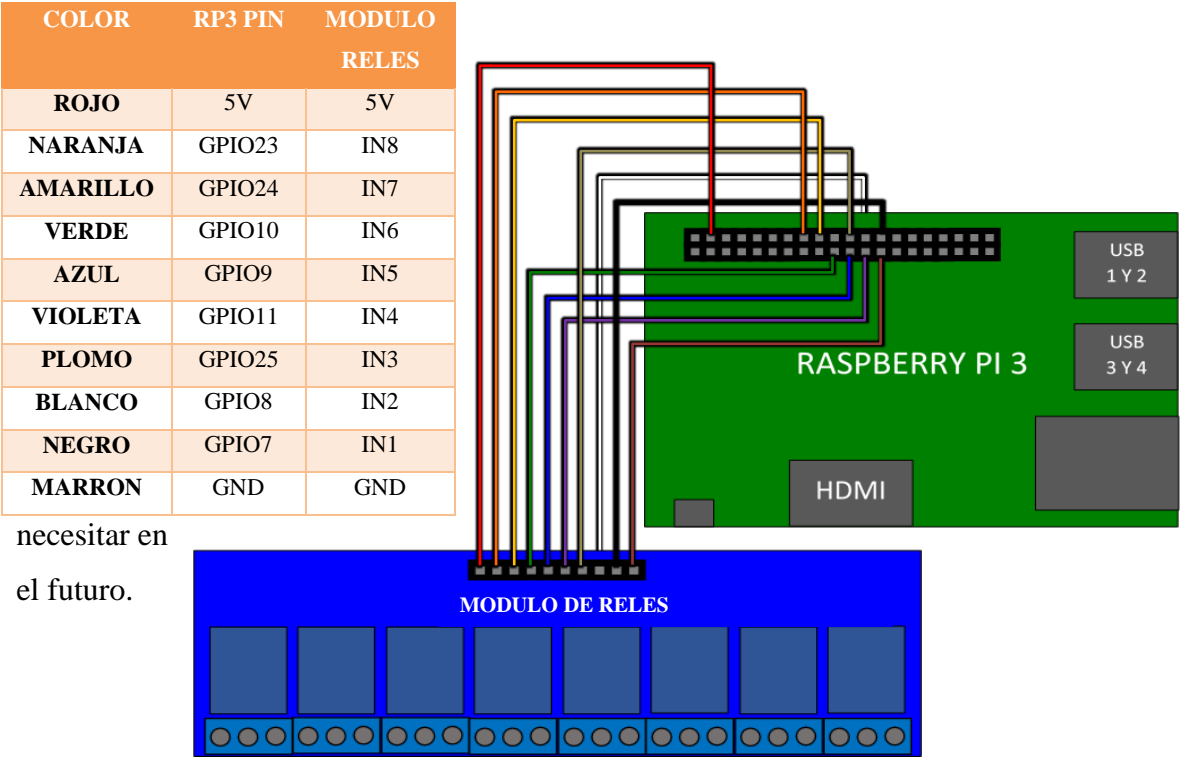
4 CABLEADO INTERNO

4.1 CABLE 14 AWG



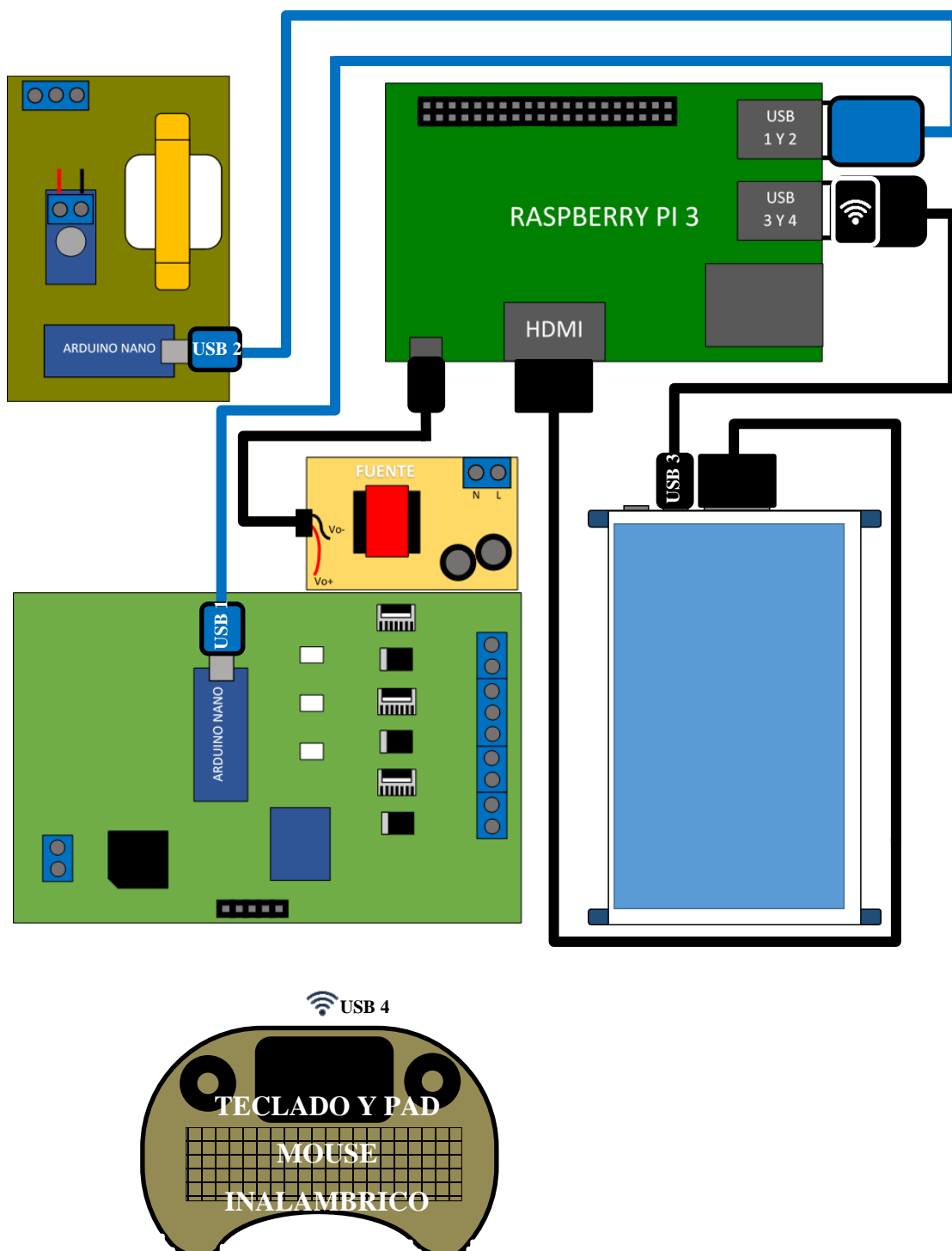
4.2 RASPBERRY – MODULO DE RELES

Los relees son activados desde los pines GPIO de la Raspberry Pi 3, para lo cual se usan cables de conexi3n de tipo hembra-hembra para espadines de diferentes colores. Los relees que activan las lineas R, S y T corresponden a las entradas 1, 2 y 3 del modulo de relees respectivamente; para el modo monof3sico linea y neutro son las entradas 5 y 4 respectivamente, finalmente para la activacion del rele de la placa del rectificador se usa la entrada 6. Los relees 7 y 8 se encuentran libres de conexiones, pero las entradas estan conectadas a la Raspberry por si se llegan a



necesitar en el futuro.

4.3 RASPBERRY Y DISPOSITIVOS



5 PROGRAMACION

5.1 ARDUINO NANO 1

Este es el encargado de generar los pulsos necesarios para la activación de los circuitos de disparo de los SCR, recibe los pulsos del cruce por cero por una de sus pines digitales que tenga la característica de interrupción (en este caso el pin 3); además recibe, por medio de comunicación serial, un numero entre 0 – 999, donde 0 corresponde a un ángulo de disparo de 0° y 999 de 180°, los cuales serán mapeados de 0 – 97% para el cálculo del tiempo de activación y desactivación de los pulsos.

```
//DECLARACION DE VARIABLES
float outputValue = 0;
float outputValue1 = 0;
float toff = (97*1000000/12000);
float ton = 0;
int num;
String leido="";

void setup() {
  Serial.begin(9600); //Velocidad de comunicacion
  //Declaracion de pines digitales de entrada y salida
  pinMode(10, OUTPUT);
  pinMode(11, OUTPUT);
  pinMode(3, INPUT);
  //Declaracion de la funcion de interrupcion "Cruce" en el pin 3
  attachInterrupt( digitalPinToInterrupt(3), Cruce, LOW);
}

void loop() {
  //LECTURA DE DATOS VIA SERIAL
  while(Serial.available()==0){
  }
  do{
    char carlei;
    carlei=Serial.read();
    leido+=carlei;
    delay(1);
  }
```

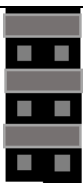
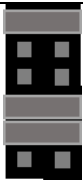
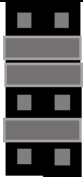
```

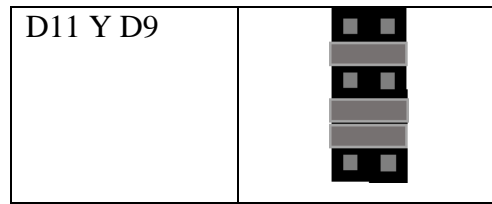
}while(Serial.available()>0);
num=leido.toInt(); //Conversion a entero
//MAPEO A PORCENTAJE DE 0% A 97%
outputValue = map(num, 0, 999, 0.00, 1023.00);
outputValue1 = map(outputValue, 0.00, 1023.00, 0.00, 97.00);
//CALCULO DE TOFF Y TON
toff = ((outputValue1)*1000000/12000);
ton = ((97-outputValue1)*1000000/12000);
num=0;
leido="";

}
void Cruce(){
  //INTERRUPCION EN EL PIN 3
  digitalWrite(11, LOW);
  digitalWrite(10, LOW);
  delayMicroseconds(toff);
  digitalWrite(11, HIGH);
  digitalWrite(10, HIGH);
  delayMicroseconds(ton);
}

```

Nota: Si se llegara a detectar falla en la generación de pulsos de una salida digital se puede cambiar el pin dañado en la programación y se deberá cambiar el/los jumper/s ubicados en la placa principal a la derecha del Arduino como se muestra a continuación.

PINES DIGITALES	JUMPERS
D12 Y D10	
D12 Y D9	
D11 Y D10	



5.2 ARDUINO NANO 2

Es el encargado de realizar la lectura de voltaje obtenida por el generador y enviar los datos por medio de comunicación serial a la Raspberry. A continuación su programación.

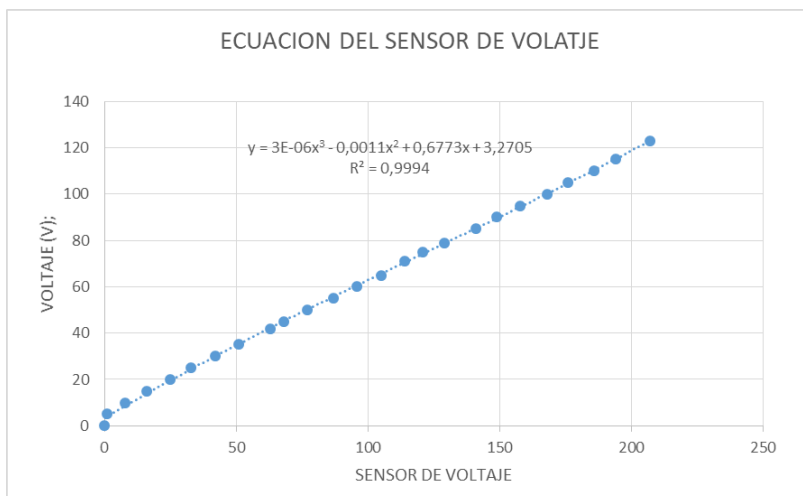
```
//DECLARACION DE VARIABLES
const int analogInPin = A0;
int sensorValue = 0, outputValue = 0;
float voltaje = 0, voltajeant = 0;
int i = 0;

void setup() {
  Serial.begin(9600); //Velocidad de comunicación
}

void loop() {
  voltaje=0;
  for (i=0; i<50; i++){
    voltajeant=voltaje;
    sensorValue = analogRead(analogInPin);
    outputValue = map(sensorValue, 0, 1023, 0, 255);
    voltaje=max(outputValue, voltajeant);
    delayMicroseconds(1000/3);
  }
  //Ecuacion obtenida mediante excell
  voltaje=((0.000003*pow(voltaje,3))-(0.0011*pow(voltaje,2))+(0.6773*voltaje)+3.2705);
  if (voltaje<=3.2705){
    voltaje=0;
  }
  Serial.println(voltaje);
  delay(150);
}
```

Para la obtención de la ecuación se realizó la adquisición de valores de ADC para distintos voltajes, como se muestra a continuación.

Sensor (0-255)	Voltaje (V)
0	0
1	5
8	10
16	15
25	20
33	25
42	30
51	35
63	42
68	45
77	50
87	55
96	60
105	65
114	71
121	75
129	79
141	85
149	90
158	95
168	100
176	105
186	110
194	115
207	123



5.3 RASPBERRY

En este manual no se incluye la programación en Python, pues no hay parámetros que deban ser modificados en el mismo.